Određivanje optimalnog toplinskog prinosa bušotinskih izmjenjivača topline i potencijal tehnologije u Republici Hrvatskoj

Strpić, Kristina

Master's thesis / Diplomski rad

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:965374

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**



Repository / Repozitorij:

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Diplomski studij naftnog rudarstva

ODREĐIVANJE OPTIMALNOG TOPLINSKOG PRINOSA BUŠOTINSKIH IZMJENJIVAČA TOPLINE I POTENCIJAL TEHNOLOGIJE U REPUBLICI HRVATSKOJ

Diplomski rad

Kristina Strpić

N269

Zagreb, 2018

Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Diplomski rad

ODREĐIVANJE OPTIMALNOG TOPLINSKOG PRINOSA BUŠOTINSKIH IZMJENJIVAČA TOPLINE I POTENCIJAL TEHNOLOGIJE U REPUBLICI HRVATSKOJ

KRISTINA STRPIĆ

Diplomski rad je izrađen na: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za naftno inženjerstvo
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

Plitki geotermalni sustavi grijanja i hlađenja koji opskrbljuju domaćinstva te objekte javne i privatne namjene, prate značajan porast u proteklom desetljeću. Jedan od razloga naglog razvoja ovog tipa tehnologije je i energetska politika EU koja zagovara proces dekarbonizacije za zemlje članice. Trend porasta broja instalacija dizalica topline može se pratiti i na području Republike Hrvatske, s nešto smanjenim intenzitetom u odnosu na ostatak Europe. S obzirom da u RH ne postoji odgovorno državno tijelo koje vodi evidenciju o broju i karakteristikama instaliranih plitkih geotermalnih sustava, u sklopu ovog diplomskog rada napravljena je početna baza dosad instaliranih sustava. Podaci o lokacijama i tehničkim parametrima sustava prikupljeni su u suradnji s tvrtkama koje se bave projektiranjem i postavljanjem bušotinskih izmjenjivača topline. Na priloženoj Google Earth Pro karti lokacije su približno unesene za sve privatne objekte kako bi se izbjeglo eksponiranje vlasnika. Inovativnom metodom termogeoloških testova na devet lokacija na području RH određen je karakterističan optimalni prinos bušotinskih izmjenjivača s obzirom na tip postavljene konstrukcije. Dobiveni prosjek toplinskog prinosa s odabranih lokacija poslužio je kao osnova procjene ukupne obnovljive energije iz plitkih geotermalnih izvora koja se koristi na području RH.

Ključne riječi: plitki geotermalni sustavi, bušotinskih izmjenjivači topline, optimalni toplinski prinos, TRT, dizalice topline

Diplomski rad sadrži: 62 stranica, 4 tablice, 27 slika i 36 referenci.

Jezik izvornika: Hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

Voditelj: Izv. prof. dr. sc. Tomislav Kurevija

Ocjenjivači: Izv. prof. dr. sc. Tomislav Kurevija
Doc. dr. sc. Luka Perković
Doc. dr. sc. Jasna Orešković

Datum obrane: 28.09.2018., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology
and Petroleum Engineering

Master's Thesis

ESTIMATION OF THE OPTIMAL HEAT EXTRACTION RATE OF BOREHOLE HEAT EXCHANGERS AND PERSPECTIVE OF THECHNOLOGY IN CROATIA

KRISTINA STRPIĆ

Thesis completed at: University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering
Department of Petroleum engineering
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract

In the last decade, there has been a tremendous growth in geothermal and aero-thermal heat pump market. The reason for this growth is the commitment to highly energy-efficient, low-carbon EU economy. Trends in installation of heat pumps in Croatia are similar to global scale of EU, but somewhat slower. Taking in to consideration that today there is no government office is in charge of supervision of installed shallow geothermal systems and obtained heat capacity, this Master's thesis provides data about the existing shallow geothermal systems. Data about locations and technical parameters of the systems have been gathered in cooperation with service companies that install the borehole heat exchangers. The Google Earth Pro chart, which is a part of this Thesis, shows the approximate locations of privately-owned systems, to maintain anonymity. Using an innovative method of thermogeological tests, optimal sustainable heat extraction rate was determined on nine locations in Croatia, with regards to the type of the building The resulting average of the optimal heat rate from chosen locations was used as a base to assess the sum of renewable energy from shallow geothermal resources used in Croatia.

Keywords: shallow geothermal systems, borehole heat exchangers, optimal heat capacity, TRT, heat pumps

Master's Thesis contains: 62 pages, 4 tables, 27 figures and 36 references.

Original in: Croatian

Archived in: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: Associated professor Tomislav Kurevija, PhD

Reviewers: Associated professor Tomislav Kurevija, PhD
Assistant professor Luka Perković, PhD
Associated professor Jasna Orešković, PhD

Defense date: September 28, 2018, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

SADRŽAJ

POPIS SLIKA I
POPIS TABLICA II
POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA II

1. UVOD 1
2. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA I IZVEDBI 3
    2.1. Istraživanja na području Republike Hrvatske 3
    2.2. Pregled postojećih instaliranih sustava na području Europe 5
3. SUSTAVI ZA ISKORIŠTAVANJE PLITKE GEOTERMALNE ENERGIJE 8
    3.1. Sustavi *otvorenog* tipa 8
    3.2. Sustavi *zatvorenog* tipa 9
4. METODOLOGIJA I TEORETSKA POZADINA 17
5. TEST ODAZIVA TOPLINE 19
    5.1. Konvencionalna metoda određivanja toplinske vodljivosti tla 20
    5.2. Inovativna metoda određivanja toplinske vodljivosti tla 24
    5.3. Određivanje veličine toplinskog otpora bušotinskog izmjenjivača 30
    5.4. Test višestrukih toplinskih uvjeta i metoda određivanja potencijala bušotinskih izmjenjivača topline 35
6. SSTRT MJERENJA NA PODRUČJU REPUBLIKE HRVATSKE 41
    6.1. Analiza lokacija s ugrađenim 2U izmjenjivačima topline 41
    6.2. Analiza lokacija s ugrađenim koaksijalnim izmjenjivačima topline 46
7. PRIKUPLJENI PODACI O PLITKIM GEOTERMALNIM SUSTAVIM U HRVATSKOJ 51
    7.1. Geološke i termogeološke karakteristike tla u Republici Hrvatskoj 52
    7.2. Prikupljeni podaci o *zatvorenim* sustavima bušotinskih izmjenjivača topline 54
8. DISKUSIJA DOBIVENIH REZULTATA 57
9. ZAKLJUČAK 59
10. LITERATURA 60

POPIS SLIKA

Slika 2-1. Broj aktivnih GSHP jedinica u 2014. i 2015. godini prema EurObserver 2016 izvješću 6
Slika 3-1. Shematski prikaz otvorenog sustava za iskorištavanje plitke geotermalne energije: a) proizvodni zdenac; b) utisni zdenac; c) dizalica topline 9
Slika 3-2. Presjeci vertikalnih bušotinskih izmjenjivača topline a) U cijev; b) 2-U sustav cijevi; c) koaksijalni sustav cijevi 11
Slika 3-3. Prikaz mogućih spojeva horizontalnih sustava izmjenjivača topline 12
Slika 3-4. Tipovi spiralnih izmjenjivača topline s označenim tokom cirkulacije radnog fluida; geotermalna košara (lijevo) i tanki spiralni sustav (desno) 13
Slika 3-5. Shematski prikaz dijelova i radnog procesa dizalice topline za vrijeme režima grijanja 14
Slika 3-6. Idealizirani termodinamički parno-kompresijski proces dizalice topline 15
Slika 5-1. Osnovni dijelovi aparature za provođenje TRT mjerenja na bušotinskom izmjenjivaču topline (vlastita grafika) 20
Slika 5-2. Tipski prikaz dobivenih podataka nakon višesatnog TRT mjerenja 21
Slika 5-3. Odnos logaritamske funkcije vremena provođenja TRT-a i razvoja prosječne temperature radnog fluida u bušotinskom izmjenjivaču 21
Slika 5-4. Prikaz tipskog modela derivacijske krivulje i odabranog prijelaza iz neustaljenog u poluustaljeni period širenja toplinskog toka 22
Slika 5-5. Odnos logaritamske funkcije vremena provođenja TRT-a i razvoja prosječne temperature radnog fluida za vrijeme ustaljenog perioda širenja toplinskog toka 23
Slika 5-6. Ponašanje tlaka za vrijeme hidrodinamičkih testova u naftnom inženjerstvu a) protočni test, b) test porasta tlaka 25
Slika 5-7. Analogija izgleda dobivenih krivulja mjerenih podataka za vrijeme provođenja hidrodinamičkih i termogeoloških testova 28
Slika 5-8. Razvoj prosječne temperature bušotinskog fluida za vrijeme testa oporavka temperature i linijski odnos za vrijeme ustaljenog stanja širenja toplinskog toka 29
Slika 5-9. Komponente toplinskog otpora kod konfiguracije U izmjenjivača 31
Slika 5-10. Komponente toplinskog otpora kod konfiguracije U izmjenjivača 31
Slika 5-11. Komponente toplinskog otpora kod koaksijalne konstrukcije toplinskih izmjenjivača 32

Slika 5-12. Tipski prikaz podataka o tlaku i protoku dobivenih step testom u hidrodinamičkim mjerenjima 37
Slika 5-13. Podaci dobiveni SSTRT-om uz pripadnu snagu toplinskih grijača za vrijeme svakog od toplinskih uvjeta 38
Slika 5-14. Potencijal pridobivanja i pohrane toplinske snage u tlo uz ustaljeno stanje širenja toplinskog toka u funkciji temperature bušotinskog fluida 40
Slika 6-1. SSTRT mjerenja na lokacijama s instaliranim 2U izmjenjivačima topline 42
Slika 6-2. Izmjerene vrijednosti temperature bušotinskog fluida 2U izmjenjivača u funkciji toplinske snage prilikom pridobivanja i pohrane topline u tlo na analiziranim lokacijama 45
Slika 6-3. SSTRT mjerenja na lokacijama s postavljenim koaksijalnim izmjenjivačima topline 47
Slika 6-4. Izmjerene vrijednosti temperature bušotinskog fluida CX izmjenjivača u funkciji toplinske snage prilikom pridobivanja i pohrane topline u tlo na analiziranim lokacijama 49
Slika 7-1. Opća geološka karta Republike Hrvatske 53
Slika 7-2. Plitki geotermalni sustavi na širem zagrebačkom području 55
Slika 7-3. Plitki geotermalni sustavi postavljeni na području Istre 55

POPIS TABLICA

Tablica 6-1 Tehnički podaci i termogeološka svojstva na analiziranim lokacijama 43
Tablica 6-2 Tehnički podaci i termogeološka svojstva na analiziranim lokacijama 48
Tablica 8-1 Proračun instalirane toplinske snage i pridobive energije iz geotermalnih izvora u režimu grijanja 57
Tablica 8-2 Proračun instalirane toplinske snage i pridobive energije iz geotermalnih izvora u režimu hlađenja 58

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

Oznaka	Jedinica	Opis
$p(r,t)$	Pa	tlak u funkciji radijusa i vremena
p_i	Pa	inicijalni tlak
r_w, r_b	m	radijus bušotine

Δp_{skin}	Pa	pad tlaka uslijed skina
p_{ws}	Pa	statički tlak u bušotini
p_{wf}	Pa	dinamički tlak u bušotini
t	h	vrijeme
Q	m^3/h	protok u hidrodinamici
q'	W/m	snaga toplinskih grijača/toplinski prinos
k	m^2	propusnost
μ	Pa s	viskoznost fluida
ϕ	/	poroznost medija
c_t	Pa^{-1}	ukupna stlačivost formacije
c	kg m^3/c s^2	specifična toplina
s	/	skin
$T(r,t)$	°C	temperatura u funkciji radijusa i vremena
ΔT_{skin}	°C	razlika temperature uslijed skin efekta
T_i	°C	inicijalna, statička temperatura
λ	W/(m°C)	toplinska vodljivost
α	m^3/h	toplinski difuzivitet/toplinska provodljivost
ρ	kg/m^3	gustoća
γ	/	Eulerova konstanta
Ei	/	eksponencijalni integral
Rb	(m°C)/W	toplinski otpor
EST/ T in	°C	temperatura uzlaznog toka fluida za vrijeme TRT-a (silazni tok za vrijeme rada dizalice topline)
LST/ T out	°C	temperatura silaznog toka fluida za vrijeme TRT-a (uzlazni tok za vrijeme rada dizalice topline)
Δt	/	faktor bezdimenzionalnog vremena

1. UVOD

Problem klimatskih promjena aktualna je tematika posljednjih nekoliko desetljeća. Mjere za ublažavanje klimatskih promjena i globalnog zatopljenja uvrštene su u različite sporazume koje su potpisale zemlje članice Europske Unije poput UNFCCC (*United Nations Framework Convention on Climate Changes*) i Kyoto protokol, prema kojima su dužne raditi na strategijama dekarbonizacije i prelasku na čišće energente. Tranzicija na čišće izvore energije već je započela i idućih 5 do 10 godina bit će presudna u ispunjavanju klimatskih i energetskih ciljeva za 2030-u i 2050-u godinu. Osim velikih industrijskih pogona i transportnih sredstava koji se javljaju kao prva asocijacija na uzrok klimatskih promjena, veliki udio čine upravo domaćinstva i manji poslovni objekti. Upotreba fosilnih goriva naročito je raširena u sustavima grijanja objekata direktno, te indirektno u sustavima hlađenja. Od finalne potrošne energije u Europskoj Uniji polovicu čini potrošnja za potrebe grijanja i hlađenja. Prema *Direktivi 2009/28/EC* (puni naziv *Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council on the promotion of the use of energy from renewable sources*) utvrđeni su po prvi put strateški ciljevi povećanja udjela obnovljivih izvora energije do 2020. Do 2020. godine Europska Unija se obavezala ostvariti smanjenje od 20% ispusta stakleničkih plinova u odnosu na 1990-u godinu, doprinos obnovljivih izvora energije u finalnoj potrošnji energije od 20% te povećanje energetske efikasnosti 20%. Takozvana 20-20-20 strategija, koja je stupila na snagu 2009. godine otvorila je put novim i čišćim tehnologijama uzimajući u obzir mogućnosti i specifičnosti svake od zemalja da ispuni dogovorene ciljeve. Zemlje članice Europske Unije već se susreću s energetskim i klimatskim ciljevima za 2030 i 2050 koji se provode uz primjenu regulacija i strateških fondova. Do 2030, Europska Unija se obvezala smanjiti ispust stakleničkih plinova za 40% u odnosu na 1990. godinu, ostvariti postotak obnovljivih izvora energije u finalnoj potrošnji energije od 27% te povećati energetsku efikasnost 27%. Ugradnjom nekog od oblika iskorištavanje obnovljivih izvora energije, domaćinstva uvelike pridonose dugoročnoj slici klimatskih promjena koju će zateći buduće generacije, a ujedno ostvaruju uštedu preko smanjenih troškova za grijanje i hlađenje objekata. Važnost doprinosa obiteljskih kuća i zgrada opisan je i u ključnim europskim regulativama koje navode kako je za ostvarivanje budućih energetskih i klimatskih ciljeva nužno smanjiti potrošnju energije u stambenim objektima kako bi se povećala energetska efikasnost u širem smislu. U *Direktivi 2009/28/EC* po prvi put je definirana upotreba geotermalnih dizalica topline kao način iskorištavanja plitkih geotermalnih resursa. Prema definiciji koja se prvo pojavila u švicarskim projektnim

shemama, plitkim geotermalnim resursom smatra se toplinska energija pohranjena do dubine od 400 m. U pravilu, već pri dubinama od 10 do 15 metara može se govoriti o geotermalnoj energiji čiji kapacitet ovisi o lokalnom toplinskom toku i toplinskoj vodljivosti tla. Stabilna i kontinuirana temperatura tla ispod tih dubina, na koju ne utječu atmosferske i klimatske promjene, omogućuje efikasnu procjenu radnih uvjeta i dimenzioniranje sustava za iskorištavanje plitke geotermalne energije. Iskorištavanje resursa plitke geotermalne energije preko dizalica topline jedan je od najefikasnijih sustava za grijanje objekata. Tome doprinosi i široka mogućnost primjene na različite tipove objekata u zgradarstvu. S obzirom da je temperatura tla ispod granice smrzavanja i utjecaja atmosferskih čimbenika, viša od temperature zraka zimi te niža od temperature zraka ljeti, dizalica topline predstavlja efikasan sustav koji omogućuje grijanje i hlađenje iz istog izvora. Isti sustav pogodan je i za grijanje potrošne tople vode, bez dodatnih troškova. Primjena sustava za iskorištavanje plitke geotermalne energije moguća je gotovo bilo gdje, različite varijante izmjenjivača topline omogućuju maksimalno iskorištavanje dostupnog prostora za ugradnju. Prema EurObserver stranici, koja prati razvoj obnovljivih izvora energije na području Europe i izdaje godišnje izvješće o broju ugrađenih sustava, do 2010. godine ugrađeno je preko milijun sustava za iskorištavanje plitke geotermalne energije s ukupnim instaliranim kapacitetom od 13 000 MWth. S druge strane, sektor za iskorištavanje plitke geotermalne energije se trenutno suočava s različitim izazovima, poput ograničenja i regulativa na državnim razinama, što rezultira stagnacijom u broju ugrađenih sustava. Također, u nekolicini zemalja, poput Republike Hrvatske (RH), i dalje ne postoji državni organ koji se bavi evidencijom broja ugrađenih sustava i njihovim kapacitetom.

2. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA I IZVEDBI

Broj ugrađenih sustava za iskorištavanje plitkih geotermalnih resursa značajno je porastao u proteklom desetljeću. To je doprinijelo razvoju brojnih računalnih programa koji služe kao pomoć pri dimenzioniranju sustava pretpostavljajući termalna svojstva tla na odabranoj lokaciji i kapacitet toplinskog prinosa bušotinskog izmjenjivača topline. U struci primjena takvih programa poput EED (*Earth Energy Designer*) i FRACTure softwarea korištena je za dimenzioniranje sustava kod kojih je potreban prinos manji od 30 kW (ASHRAE, 2011). Pretpostavka termalnih svojstava tla na temelju kataloških podataka za određene litološke slojeve rezultira značajnih opsegom pogreške što dovodi do predimenzioniranih, odnosno poddimenzioniranih sustava. To izravno utječe na isplativost samog projekta, što je uz doprinos na smanjenje utjecaja klimatskih promjena na lokalnoj razini, upravo glavna prednost ovakvih sustava. Najpouzdanija metoda pridobivanja podataka o toplinskim karakteristikama tla za određenu lokaciju je provođenje testa toplinskog odaziva tla, (u nastavku TRT (engl. *Thermal Response Test*). Postupak provođenja TRT-a objašnjen je u poglavlju 5. Podaci dobiveni iz konvencionalnog TRT podložni su vanjskim utjecajima poput fluktuacija električne mreže na koju su spojeni grijači TRT aparature i promjenjivost ambijentalne temperature koja utječe na površinske vodove. Dugotrajna mjerenja TRT aparaturom utječu na kapitalni trošak instalacije sustava, tako da su posljednjih godina mnoga istraživanja usmjerena upravo u poboljšane metode interpretacije mjerenih podataka i smanjenje trajanja testa uz istovremenu regulaciju utjecaja vanjskih čimbenika na podatke.

2.1. Istraživanja na području Republike Hrvatske

Iz opusa istraživanja plitkih geotermalnih potencijala i termalnih svojstava tla na području Republike Hrvatske, potrebno je spomenuti projekt „ Research and the Promotion of the Use of Shallow Geothermal Potential in Croatia“ (Grant no. IPA2007/HR/161PO/001-040506), financiran od strane strukturnih fondova Europske Unije, koji je proveden u suradnji djelatnika Fakulteta strojarstva i brodogradnje (Zagreb) i Hrvatskog geološkog instituta. U sklopu projekta postavljeno je osam bušotinskih izmjenjivača topline na području Panonske nizine i Dinarida, s ciljem da se obuhvate karakteristične geološke formacije na području RH. Na postavljenim sustavima provedena je inovativna metoda TRT-a, takozvani distribuirani TRT koji uključuje ugradnju optičkih kabela u cijevi izmjenjivača i time omogućuje monitoring temperature tla po profilu dubine ugradnje izmjenjivača (Soldo et al., 2016a). Time je omogućeno pridobivanje podataka o statičkoj temperaturi tla koja nije pod utjecajem trenja fluida koje nastaje za vrijeme cirkulacije i pokretanja pumpe. Izmjerena

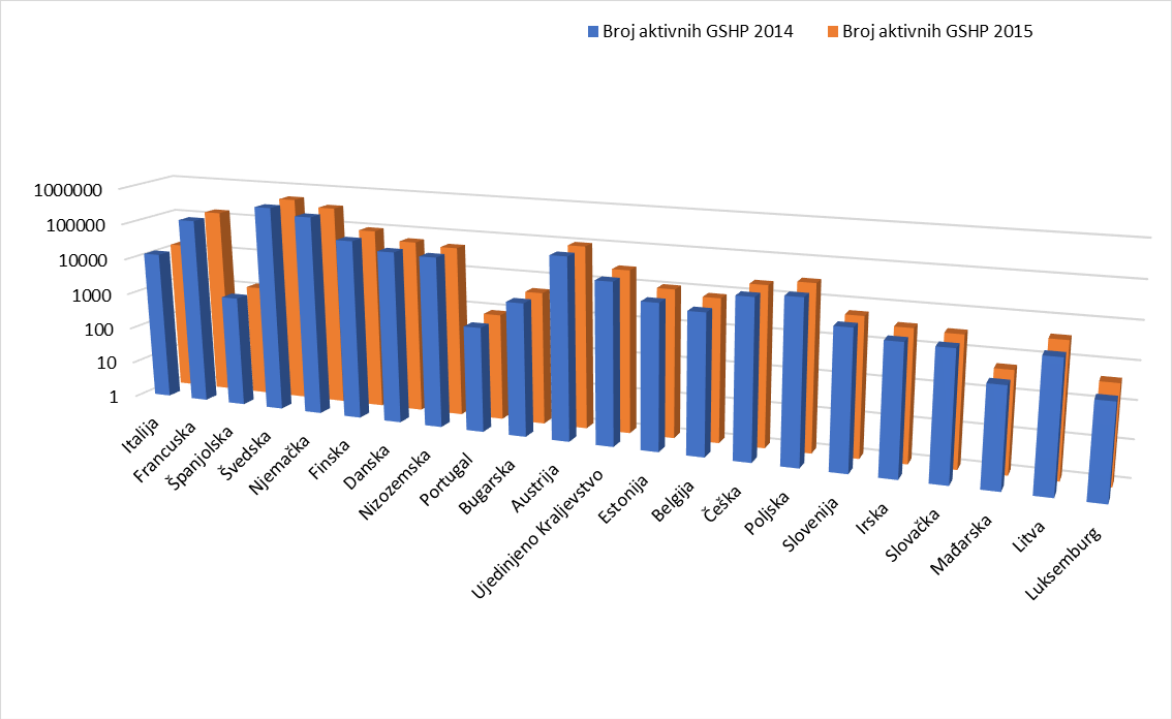
statička temperatura na dubini od 100 m kreće se od 13,5°C do 14,9°C na području Panonske nizine, odnosno između 10,5°C i 12°C na području Dinarida na lokacijama smještenim u planinskom krajoliku i 16,2°C na lokacijama koje su bliže obali mora. Toplinska vodljivost tla, koja je uz statičku temperaturu tla najvažniji razmatrani parametar prilikom dimenzioniranja plitkih geotermalnih sustava, određena je za desetometarske intervale svakog od profila postavljenih izmjenjivača. Izračunate vrijednosti toplinske vodljivosti kreću se u rangu od 1,6 W/(m K) do 2,1 W/(m K) za područje Panonske nizine dok su za područje Dinarida očekivano više s obzirom na geološki sastav tla i kreću se od 2 W/(m K) do čak 3,2 W/(m K). Prikupljeni podaci ukazuju na važnost terenskih mjerenja kao jedinog izvora točnih podataka o toplinskim svojstvima tla koji značajno variraju čak i na području istih geoloških regija. Također, navedene statičke temperature tla za područje Panonske nizine ukazuju na znatno manji geotermalni gradijent za navedeno područje od onog koji je određen geofizičkim mjerenjima u dubokim istražnim bušotinama i koji iznosi 0,049°C/m (EIHP, 1988). Inovativne metode provođenja TRT-a i interpretacije prikupljenih podatka razrađene su u istraživanju „Razvoj nove metode izvođenja i interpretacije testa toplinskog odaziva tla primjenom modela hidrodinamičkih ispitivanja u naftnom inženjerstvu“ koje je provedeno sa svrhom prijave na natječaj za Rektorovu nagradu na Sveučilištu u Zagrebu (Strpić, 2017), a obuhvaća ekstenzivna mjerenja od preko 2000 h provedena na istražnim koaksijalnim bušotinskim izmjenjivačima topline postavljenim na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu. Od obrađenih inovativnih metoda korisno je istaknuti test oporavka temperature (engl. *Recovery Test*) koji omogućuje preciznije određivanje toplinske vodljivosti i test s višestrukim toplinskim uvjetima (engl. *Step Test*) pomoću kojeg je moguće odrediti i toplinski kapacitet bušotinskog izmjenjivača topline za odabranu lokaciju. Početna istraživanja inovativnih metoda poslužila su kao osnova za detaljniju razradu metoda i nastanak nekoliko znanstvenih radova. Kurevija i Strpić (2018a) usporedili su primjenu koaksijalnih i 2U bušotinskih izmjenjivača topline na području grada Zagreba u istom geološkom okruženju. Na obje lokacije bušotinski izmjenjivači topline dolaze u kontakt s podzemnom vodom pri dubini oko 10 m. U teoriji, prednost koaksijalnih izmjenjivača vidljiva je upravo u takvoj sredini zbog dodatnog prijenosa topline putem advekcije, uz prijenos topline kondukcijom koji je karakterističan za sve vrste izmjenjivača. Ipak, istraživanje je pokazalo da za područje grada Zagreb, 2U izmjenjivači imaju manji toplinski bušotinski otpor te njihova konstrukcija uzrokuje manju pojavu pada tlaka u sustavu izmjenjivača i manji protok, odnosno snaga pumpe, je potreban da bi se održao turbulentni protok radnog fluida. Uz primjenu nove metode *step testa* određen je i pridobivi toplinski

kapacitet iz svakog od izmjenjivača, gdje se 2U konstrukcija također pokazala pogodnija za lokaciju grada Zagreba s prinosom od 54,5 W/m u usporedbi s prinosom od 43,5 W/m iz koaksijalnih izmjenjivača za ustaljeno širenje toplinskog toka. 2018. godine Kurevija i tim suradnika s Rudarsko-geološko naftnog fakulteta (2018b) dodatno su obradili metodu *step testa* za određivanje kapaciteta pohrane toplinske energije koaksijalnih izmjenjivača topline na različitim lokacijama na području grada Zagreba. Istraživanje je pokazalo da koaksijalni bušotinski izmjenjivači topline nisu pogodni za pasivno hlađenje s obzirom na vrlo niske mogućnosti pohrane topline energije u tlo, već bi se uvijek trebali dimenzionirati za opciju aktivnog hlađenja gdje kompresor dizalice topline radi u klasičnom parnom kompresijskom ciklusu. Test oporavka temperature (Kurevija et al., 2018c) obuhvaća period praćenja temperature nakon klasičnog TRT-a. Metoda je proizašla iz hidrodinamičkih mjerenja i promatranja oporavka vrijednosti tlaka nakon konstantne proizvodnje na istražnim naftnim bušotinama. Navedena analogija trenda oporavka promatranog parametra omogućuje primjenu Hornerove metode za proračun toplinske vodljivosti tla. Dobivene vrijednosti u tom slučaju nisu podložne greškama zbog fluktuacija napona lokalne električne mreže i utjecaja ambijentalne temperature.

2.2. Pregled postojećih instaliranih sustava na području Europe

U proteklih 20 godina EurObserver je jedan od najpoznatijih portala koji se bavi praćenjem napretka u broju instaliranih sustava koji koriste obnovljive izvore energije u različitim sektorima uz statistiku za svaku državu članicu Europske Unije. Detaljna izvješća za svaki od izvora obnovljive energije izlaze na godišnjoj bazi. Baza za izradu izvješća, u kojem su navedeni i indikatori porasta ili pada u broju instaliranih sustava, su izvješća različitih sudionika za području energetike i poznatih energetskih časopisa. Pristup izvješćima je dostupan svim web korisnicima. EurObserver na taj način služi kao odličan pokazat koliko su zemlje članice Europske Unije zapravo blizu ostvarenju energetskih ciljeva za 2020. godinu. Prema posljednjem dostupnom izvješću o broju instaliranih toplinskih dizalica iz 2016. godine s provedenom analizom za 2015. godinu zabilježen je značajan porast u broju prodanih dizalica topline. Izvješće uključuje statistiku za nekoliko vrsta sustava: toplinske pumpe koji kao izvor topline koriste zrak (engl. *air source heat pumps, aerothermal pumps*), toplinske pumpe koje kao izvor topline koriste tlo (engl. *ground source heat pumps, GSHP*) te naizmjenične toplinske pumpe koje se mogu koristit u režimu

hlađenja i grijanja pod uvjetom da ispunjavaju norme *Direktive 2009/28/ER*. Brojke pokazuju stabilizaciju u broju prodanih GSHP uređaja nakon dugogodišnje varijacije i trenda koji je pokazivao pad. Najveći rast zabilježen je u broju instaliranih aero-termalnih pumpi i izmjeničnih pumpi što je u korelaciji s klimatskim promjenama i potrebom za hlađenjem prilikom sve toplijih ljetnih mjeseci. Sukladno tome porast je zabilježen upravo u državama poput Italije, Francuske, Španjolske i Portugala (slika 2-1.). Porastu prodaje GSHP u zemljama poput Njemačke pridonijela je snažna politika energetske efikasnosti propisane za nove objekte gdje je zabilježen rast od 10% u 2015. godini u odnosu na 2014., odnosno prodano je gotovo 25 000 jedinica GSHP. Skandinavske zemlje s hladnijom klimom također se iz godine u godinu pokazuju kao dobro tržište za postavljanje klasičnih GSHP-a zbog klimatskih karakteristika koje uvjetuju režim grijanja kao prioritet i brojnih poticaja državne uprave.



Slika 2-1. Broj aktivnih GSHP jedinica u 2014. i 2015. godini prema EurObserver 2016 izvješću

U Republici Hrvatskoj ne postoji državno tijelo zaduženo za evidenciju i sistematiku broja postavljenih plitkih geotermalnih sustava. Kvalitetna i detaljna baza podataka o svojstvima tla na velikom broju lokacija uvelike smanjuje rizik, a time i troškove, kod instalacije novih sustava. Od velike je pomoći inženjerima i projektantima kod početnih procjena i kasnije

usporedbe s kvalitetom i prinosima postojećih sustava. Također, brojna istraživanja upozoravaju na važnost evidencije rasporeda i broja ugrađenih sustava u urbanim sredinama gdje je sve veća potreba za hlađenjem u vrućim ljetnim mjesecima. Takve su sredine zbog velikih betonskih površina, brojnih razgranatih sustava kanalizacije i manjka zelenih površina, pod utjecajem efekta koji se naziva „*urban heat island effect*“ i opisuje povećanu temperaturu u podzemlju urbanih sredina i do 20 m dubine u odnosu na ruralne sredine (Bayer et al., 2016). Opasna posljedica takvog efekta uz korištenje tla kao spremišta topline uz plitke geotermalne sustave za vrijeme ljeta, dolazi do povećanja temperature podzemne vode kojoj iz tog razlog raste pH vrijednost, odnosno pada kvaliteta (Epting et al., 2017).

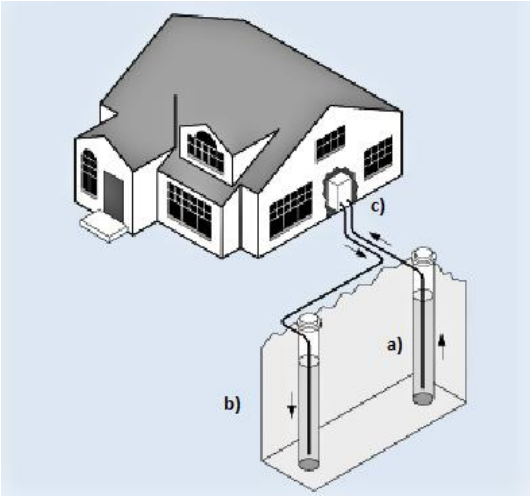
3. SUSTAVI ZA ISKORIŠTAVANJE PLITKE GEOTERMALNE ENERGIJE

Sustav izmjenjivača topline povezuje geotermalnu dizalicu topline s podzemljem i omogućuje ekstrakciju/pridobivanje topline iz tla u periodu grijanja, odnosno utiskivanje/spremanje topline u tlo u periodu hlađenja. Sustav generalno može biti definiran kao *otvorenog* ili *zatvorenog* tipa. Potrebno je uzeti u obzir nekoliko čimbenika prilikom odabira odgovarajućeg sustava za specifičnu lokaciju, poput hidrogeoloških parametara podzemlja na lokaciji, dostupan prostor za ugradnju i potencijalne izvore dodatne topline poput plitkih izdanaka ruda u podzemlju. Bitnu ulogu ima i ekonomska pozadina u obliku poreznih stopa i olakšica za ovakve oblike pridobivanja toplinske energije. Proces projektiranja broja i kapaciteta bušotinskih izmjenjivača mora biti proveden od strane certificirane osobe. U slučaju da se radi o zdencima, sam postupak izrade uključuje prisutnost konzultanata koji predstavljaju odgovorno državno tijelo za postupanje s podzemnim vodama, kao i uključivanje hidrogeologa u procjenu kapaciteta zdenaca.

3.1. Sustavi *otvorenog* tipa

Kod sustava *otvorenog* tipa, podzemna voda se kao prijenosnik i izvor topline dovodi kroz zdenac, direktno na isparivač dizalice topline ili na izmjenjivač topline na površini. Iako je podzemna voda dragocjen resurs u smislu pitke vode, ovi sustavi nailaze na brojnu primjenu. Razlog tome je što su efikasniji od zatvorenih sustava, podzemna voda je stabilne temperature kroz cijelu godinu te voda ima izvrsna svojstva prijenosa topline zbog svog visokog specifičnog toplinskog kapaciteta (4,18 kJ/kg K pri sobnoj temperaturi). Dubina zdenca iznosi od 4 do 50 m (Omer, 2008). Nakon prolaska kroz izmjenjivač topline dizalice, proizvedena voda se ovisno o mogućnostima, ispušta u obližnje vodotoke ili utiskuje natrag u vodonosnik kroz utisni zdenac. Opcija s utiskivanjem proizvedene vode osigurava dugoročnost sustava. Proizvodni zdenac opremljen je s uronjivom pumpom, uzlaznom cijevi i kabelom. Protok vode mora biti stabilan i iznositi barem 10 litara u minuti za 10 kW instalirane snage dizalice topline (Omer, 2008). Uronjiva pumpa uvijek mora biti ispod najniže očekivane razine vode u zdencu. Utisni zdenac je opremljen s cijevi koja se pruža ispod razine vode u zdencu. Za vrijeme perioda grijanja i pridobivanja topline, proizvedena voda koja je predala toplinu dizalici, pothlađena se utiskuje u utisni zdenac s temperaturom 4 do 5°C manjom od proizvodne. U slučaju da udaljenost među zdencima nije dostatna, s

vremenom može doći do prodora hladnije fronte utisne vode do proizvodnog zdenca s toga je pravilna dimenzioniranost sustava od iznimne važnosti (slika 3-1.). Kod *otvorenog* sustava je potrebno uzeti u obzir i specifikacije podzemne vode i samog vodonosnika. Potrebna je optimalna propusnost vodonosnog sloja za proizvodnju dovoljnih količina vode bez izazivanja pada razine u proizvodnom zdencu. Niski udio željeza u podzemnoj vodi je bitan da se izbjegnu problemi čepljenja cjevovodnog sustava i korozije.



Slika 3-1. Shematski prikaz otvorenog sustava za iskorištavanje plitke geotermalne energije: a) proizvodni zdenac; b) utisni zdenac; c) dizalica topline (Omer, 2008)

3.2. Sustavi *zatvorenog* tipa

Zatvoreni sustavi se obično sastoje od više izmjenjivača topline ugrađenih u podzemlje, postavljenih *vertikalno* ili *horizontalno*.

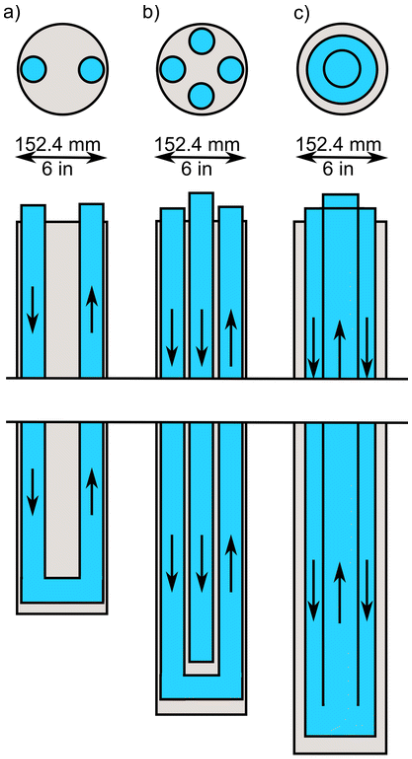
Vertikalni zatvoreni sustavi najčešće se izrađuju do dubina od 200 m. Radni fluid, koji cirkulira u instaliranom sustavu cijevi bušotinskog izmjenjivača ima ulogu prijenosnika topline iz podzemlja do geotermalne dizalice topline na površini. Fluid je voda s mogućim dodatkom sredstava za snižavanje ledišta (engl. *antifreez aditives*), najčešće se radi o polietilen glikolu i etilen glikolu. Utjecaj aditiva na hidraulička i termogeološka svojstva bušotinskih izmjenjivača topline analiziran je u mnogim istraživanjima, čak i na primjeru bušotinskih izmjenjivača na području Zagreba (Kurevija i Strpić, 2018a). Osnovni tipovi *vertikalnih* izmjenjivača topline su:

- U-cijevi, sastoji se od konfiguracije dviju uspravnih cijevi spojenih na donjem kraju pod kutom od 180°. U istu bušotinu se može postaviti nekoliko U konfiguracija cijevi, čak četiri ili šest. Najčešća varijanta je postavljanje duple U cijevi (2-U) (slika 3-2. a)

i b)). Osnovna prednost je niska cijena komada cijevi i veliki broj ugrađenih sustava, što rezultira brojnim računalnim programima (GLD,EED) koji služe kao pomoć pri dimenzioniranju sustava za iskorištavanje plitkih geotermalnih resursa uz ovaj tip bušotinskih izmjenjivača. Obično se postavljaju do dubina od 100 m, ovisno o potrebnom toplinskim kapacitetu.

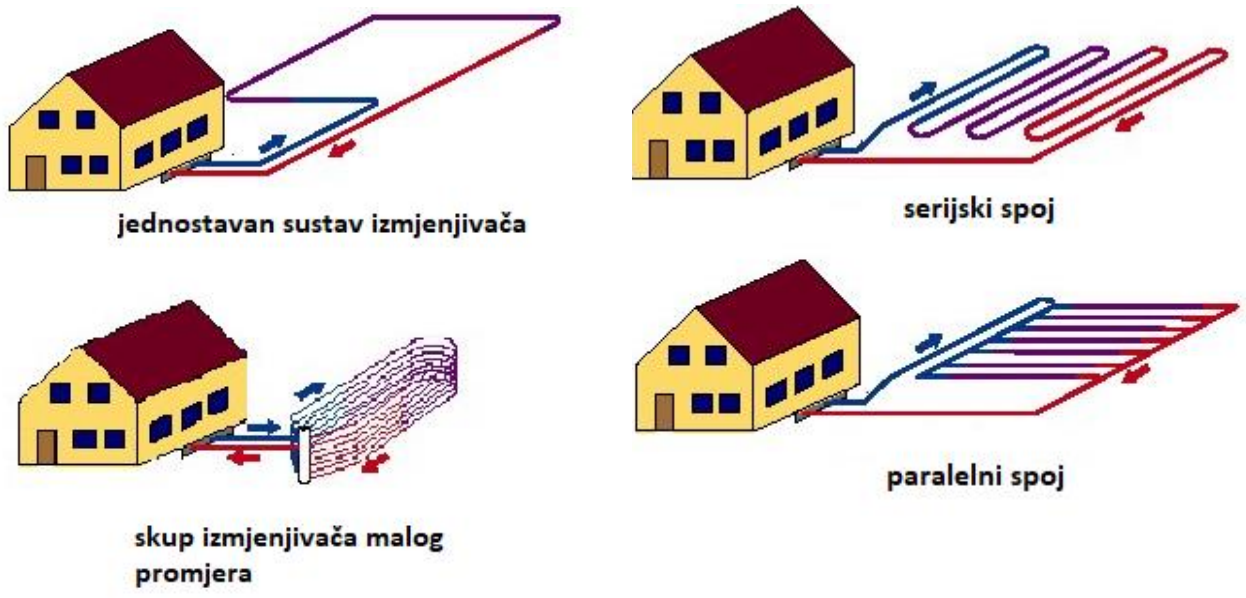
- Koaksijalni tip bušotinskih izmjenjivača sastoji se od dvije cijevi postavljene jedna u drugu. Cirkulacijski tok unutar cijevi moguće je izvesti na dva načina, da se uzlazni tok fluida koji ide prema dizalici topline kreće prstenastim prostorom konfiguracije uz povratni tok kroz središnju cijev i obrnuto (slika 3-2. c) Njihova prednost je moguća instalacija s odmakom od vertikale od 30°do 60°prilikom čega se iz istog instalacijskog šahta može postaviti više izmjenjivača i ostvariti značajna ušteda prostora. Postavljaju se do dubine od 50 m.

Iz geološke perspektive, *vertikalni* sustavi bušotinskih izmjenjivača mogu se postaviti neovisno o litološkim svojstvima tla. Najpovoljnije vrste tla za postavljanje su sedimenti s visokim udjelom silicija i konsolidirani pješčenjaci male propusnosti. Osim za aktivno grijanje objekata preko geotermalne dizalice topline, vertikalni sustavi bušotinskih izmjenjivača mogu se koristiti i za potrebe aktivnog i pasivnog hlađenja. U slučaju više postavljenih sustava, potrebno je uzeti u obzir njihov horizontalni razmak da ne bi došlo do interferencije toplih odnosno hladnih fronti. Preporučeni razmak je barem 6 metara, idealno 9 metara među sustavima, da bi se ostvario optimalni toplinski oporavak tla i dugoročnost sustava (Kurevija et al., 2012).



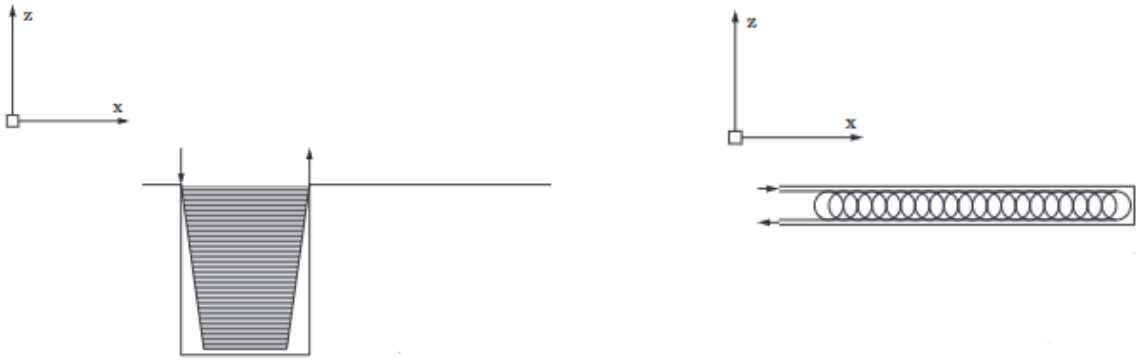
Slika 3-2. Presjeci vertikalnih bušotinskih izmjenjivača topline a) U cijev; b) 2-U sustav cijevi; c) koaksijalni sustav cijevi (Raymond, 2015)

*Horizontalni zatvoren*i sustavi izmjenjivača topline koriste se za iskorištavanje vrlo plitke geotermalne energije. Sustavi se obično ugrađuju do dubina od 2 m. Energetska efikasnost sustava raste s većom dubinom s obzirom na manji utjecaj atmosferskih čimbenika. No, s druge strane, veće dubine utječu na ekonomsku isplativost projekta, s obzirom da je kod postavljanja horizontalnih sustava izbjegnut najznačajniji trošak vezan za plitke geotermalne sustave, a to je bušenje dubokih bušotina. U ovom slučaju se izmjenjivači topline postavljaju u rovove koje izrađuju građevinski radni strojevi. Bitan preduvjet za odabir ovakve vrste sustava je veća površina dostupnog prostora za postavljanje bušotinskih izmjenjivača, kao što je vidljivo na primjerima sa slike 3-3. Ovakav tip sustava podložan je sezonskim utjecajima promjene temperature i vlage tla s obzirom na promjenjiva količine padalina koja se zadržava u plitkim predjelima tla. Radni fluid je voda uz obavezan dodataka sredstava za snižavanje ledišta što povećava viskoznost radnog fluida. Uz činjenicu da je duljina cijevnog sustava kod *horizontalnog* tipa izmjenjivača dulja nego u slučaju vertikalnih sustava, povećana viskoznost radnog fluida uz veću duljinu cijevi može značajno utjecati na povećan potreban rad pumpe, a time i koeficijent efikasnosti sustava.



Slika 3-3. Prikaz mogućih spojeva horizontalnih sustava izmjenjivača topline (Omar, 2008)

U posljednjih desetak godina, razvile su nove varijante izmjenjivača topline. Njihova svrha je ispuniti zahtjeve ekonomske isplativosti na način da se postigne što veća ugrađena površina izmjenjivača topline uz što manju potrebnu dubinu bušotina, odnosno površinu rovova kod horizontalnih sustava. Na taj način, sustav izmjenjivača je koncentriran na manjem volumenu prostora uz jednaku učinkovitost i niže inicijalne troškove ugradnje. Konfiguracija koja ispunjava te zahtjeve je spiralni tip izmjenjivača topline (Tinti et al., 2014.). Pojavljuje se u nekoliko oblika pogodnih za vertikalne i horizontalne tipove sustava (slika 3-4.) od kojih su najpoznatiji geotermalne košare (engl. *geothermal baskets*) i tanke spirale koje se koriste kod horizontalnih sustava (engl. *slinky spiral ground colector*). Najveći izazov kod ovakvih inovativnih tipova izmjenjivača topline je teško određivanje toplinskog prinosa po jedinici duljine izmjenjivača s obzirom da je svaki od sustava jedinstven i geometrijski kompleksan. Postojeći računalni programi koji se koriste u dimenzioniranju konvencionalnih tipova izmjenjivača topline slijede pretpostavke koje se ne mogu upotrijebiti u slučaju spiralnih izmjenjivača s obzirom da ne razmatraju segment volumena tla sadržan u unutrašnjosti spiralne konstrukcije (Man et al., 2010). Dosadašnje procjene jediničnih toplinskih prinosa spiralnih izmjenjivača topline temelje se na terenskim iskustvima i klasifikaciji proizvođača koju treba uzeti s oprezom.



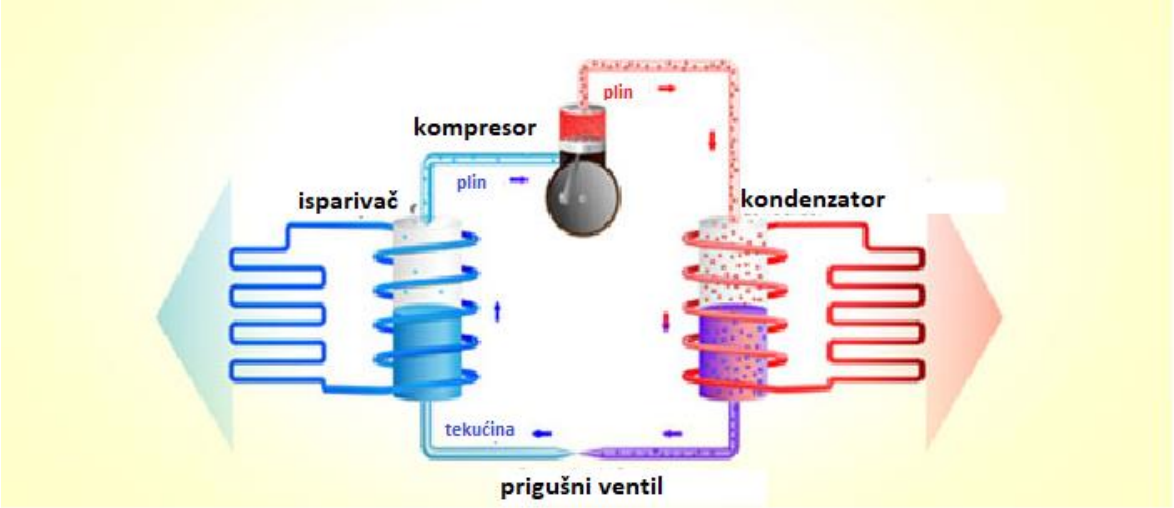
Slika 3-4. Tipovi spiralnih izmjenjivača topline s označenim tokom cirkulacije radnog fluida; geotermalna košara (lijevo) i tanki spiralni sustav (desno) (Tinti et al, 2014)

U suradnji sa sektorom graditeljstva razvijen je i potpuno novi tren postavljanja plitkih geotermalnih sustava. Izmjenjivači topline, tzv. *energetski piloti*, postavljaju se pod temelje novoizgrađenih građevinskih objekata. Time dolazi do značajne uštede s obzirom na konvencionalne načine ugradnje bušotinskih izmjenjivača gdje je kapitalni trošak najveći. S obzirom da su energetski piloti postavljeni ispod građevinskih objekata, osigurana je dodatna zaštita od sezonskih atmosferskih utjecaja koju osigurava sam objekt. Zasad je jedi na prepreka širem razvoju ovakvog tipa bušotinskih izmjenjivača nedostatan broj ugrađenih sustava na kojima se ispitao konkretan utjecaj naprezanja koja se događaju u temeljima građevinskih objekata uslijed ekstrakcije toplinske snage (Laloui i Di Donna, 2013).

3.3. Rad dizalice topline

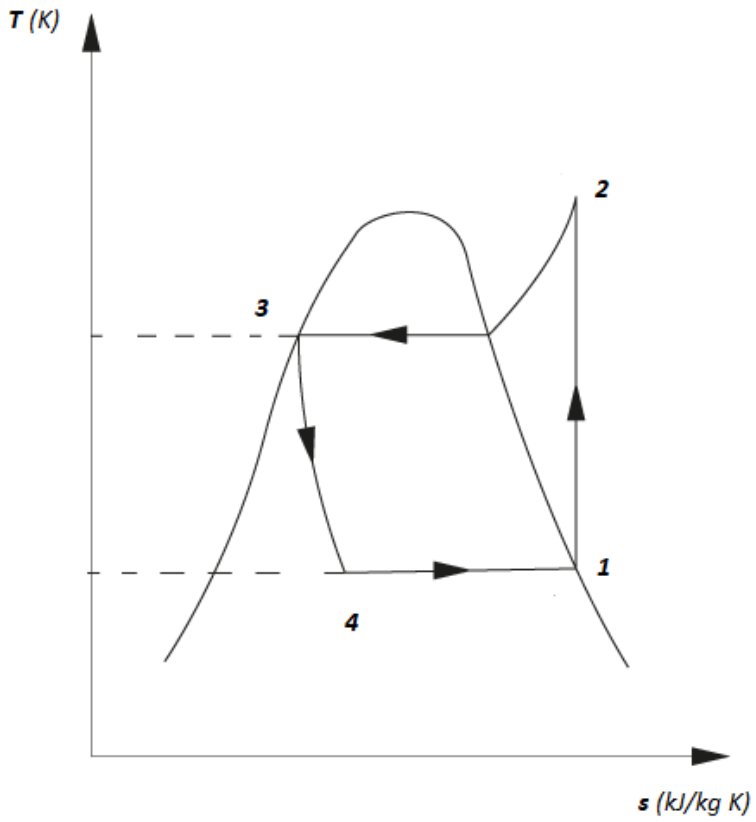
Pod pojmom dizalice topline ili toplinske pumpe podrazumijevaju se svi uređaji koji u radnom procesu oduzimaju toplinu iz spremnika niže temperature i predaju je spremniku više temperature uvećanu za energiju kompresije. Osnovni elementi dizalice topline su kompresor, kondenzator, prigušni ventil i isparivač s radnim medijem (*engl. refrigerant*) (slika 3-5.). Kao radni medij koristi se visoko hlapiva organska tvar – freon. Na isparivaču se oduzima toplina mediju koji predaje toplinu. Izvor topline može biti prirodnog i umjetnog podrijetla, odnosno to može biti okolni zrak, tlo, podzemna voda ili jezera, te u slučaju umjetnih izvora otpadni zrak industrijskih procesa, otpadne vode ili plinovi izgaranja. Bitne predispozicije izvora topline su stalna raspoloživost te dostatna i stalna temperatura tijekom

cijele godine. Koeficijent efikasnosti dizalice topline uvelike ovisi o svojstvima izvora topline.



Slika 3-5. Shematski prikaz dijelova i radnog procesa dizalice topline za vrijeme režima grijanja (Budin i Mihelić-Bogdanić, 2012)

Radni proces dizalice topline za vrijeme režima grijanja započinje komprimiranjem rashladnog sredstva uz utrošak mehaničkog rada (1-2 slika 3-6.). Slijedi hlađenje rashladnog sredstva što uzrokuje njegovu kondenzaciju (2-3). Oslobođena toplina koju je preuzeo spremnik vode koristi se za svrhe poput grijanja prostora i pripreme potrošne tople vode. Nakon kondenzacije, rashladni medij se prigušuje do tlaka i temperature koji vladaju u isparivaču (3-4). Prigušeni rashladni medij u isparivaču preuzima toplinu d izvora topline, primjerice cirkulacijskog bušotinskog fluida koji je poprimio stabilnu temperaturu tla na dubini ugradnje i proces se ponavlja. Promjena stanja rashladnog fluida u isparivaču prikazana je linijom od točke 4 do 1.



Slika 3-6. Idealizirani termodinamički parno-kompresijski proces dizalice topline (Budin, Mihelić-Bogdanić, 2012)

Koeficijent efikasnosti dizalice topline (engl. *coeficient of performance, COP*- u slučaju režima grijanja, *energy efficency ratio, EER* – u slučaju režima hlađenja) ili toplinski množitelj za vrijeme režima grijanja ili hlađenja ($\varepsilon_{gr}, \varepsilon_{hl}$) ovisi o izlaznoj temperaturi, odnosno temperaturi koja se finalno predaje mediju koji sudjeluje u procesu grijanja objekta i/ili potrošne tople vode. COP je omjer isporučene energije za grijanje ili hlađenje objekta i utrošenog rada kompresora:

$$\varepsilon_{gr} = \frac{Q_{gr}}{P_{komp}}, \; \varepsilon_{hl} = \frac{Q_{hl}}{P_{komp}} \tag{3-1}$$

Gdje je :

$Q_{gr}, Q_{hl} =$ učinak toplinske dizalice (W)

$P_{komp} =$ snaga kompresora (W).

Za proračun i dimenzioniranje sustava grijanja koristi se godišnji toplinski množitelj (engl. *Seasonal performance Factor, SPF*) koji se izražava kao

$$SPF = \frac{\sum_{god}(Q_{gr} + Q_{PTV})}{\sum_{god} E_{sustav}} \ . \qquad (3\text{-}2)$$

$\sum E_{sustav}$ - ukupna godišnja el. energija utrošena na pogon kompresora, pumpi, ventilatora, pomoćnog grijača, te sustava odleđivanja isparivača (kWh)

Q_{gr} - godišnja potrebna toplinska energija za grijanje objekta (kWh)

Q_{PVT} - godišnja potrebna toplinska energija za zagrijavanje potrošne tople vode (kWh)

Prema *Direktivi 2009/28/EC* (Aneks VII) dizalice topline ubrajaju se u obnovljive izvore energije u slučaju kad je postignut odnos

$SPF > 1{,}15 \times \frac{1}{\eta_{el}}$.

$\eta_{el} =$ električna učinkovitost sustava proizvodnje električne energije i specifična je za svaku zemlju zasebno

Udio energije koji dolazi isključivo iz obnovljivih izvora energije može se prikazati pomoću izraza:

$$E_{OIE} = Q_{ISKORISTIVO} * \left(1 - \frac{1}{SPF}\right) \qquad (3\text{-}3)$$

Proizvođači ispituju koeficijent efikasnosti toplinske dizalice s obzirom na 4 učestale projektirane izlazne temperature radnog fluida (Klein, 2012): 35°C (W35), 45°C (W45), 55°C (W55) i najviša projektirana izlazna temperatura koja odgovara projektiranoj temperaturi ogrjevnih tijela u objektu 65°(W65). Niža projektirana izlazna temperatura radnog fluida omogućuje postizanje većeg koeficijenta efikasnosti. Najveći koeficijent efikasnosti ostvaruju sustavi podzemnog grijanja unutar dobro izoliranih.

4. METODOLOGIJA I TEORETSKA POZADINA

Konvencionalna metoda interpretacije podataka iz TRT mjerenja temelji se na pretpostavci da bušotinski izmjenjivač topline značajne duljine i zanemarivog radijusa može biti opisan kao linijski izvor (engl. *line source*). Line source teorija, koja se prema začetniku još naziva i Kelvinova line source teorija, daje analitičko rješenje za opis radijalnog prijelaza topline i promjene temperature u funkciji vremena i radijusa tijekom provođenja TRT-a (Carslaw i Jager, 1946; Ingersol et al., 1954; Lee, 1982).Teorije je nastala kao proširenje Fourierovog zakona koji opisuje konduktivni prijenos topline u čvrstim materijalima i koji je analogno primijenjen za opisivanje rješenja promjene tlaka za vrijeme radijalnog širenja fluida u poroznom mediju (Narashiman, 1999). Oba rješenja izvedena su iz parcijalne jednadžbe difuziviteta (4-1, 4-2). Za slučaj radijalnog protoka fluida male i konstantne stlačivosti i konstantne viskoznosti prema bušotini kroz homogeni porozni medij uz mali gradijent tlaka, jednadžba difuziviteta može se izraziti kao:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial p}{\partial r} = \frac{\phi \mu c_t}{k}\frac{\partial p}{\partial t} \quad , \tag{4-1}$$

gdje član $\frac{k}{\phi \mu c_t}$ opisuje faktor hidrauličkog difuziviteta, η , u naftnom inženjerstvu.

U termogeologiji, širenje topline radijalno koduktivnim putem kroz čvrsti medij može se opisati kao:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r} = \frac{c\rho}{\lambda}\frac{\partial T}{\partial t} \quad , \tag{4-2}$$

a član $\frac{\lambda}{c\rho}$ opisuje faktor toplinskog difuziviteta, odnosno toplinske provodljivosti i u termogeologiji se označava kao α .

S obzirom na isto teorijsko podrijetlo rješenja, moguće je postaviti analogiju između praktičnih metoda iz naftnog inženjerstva i metoda iz termogeologije. Rješenje jednadžbe difuzije (4-3) primjenjuje se u naftnom inženjerstvu u području hidrodinamičkih mjerenja (engl. *well testing*) kroz cijelo proteklo stoljeće, što je dovelo do razvoja brojnih empirijskih metoda i varijacija u području mjerenja i interpretacije podataka. Upravo to je razlog pretpostavci da se metode iz termogeologije i TRT mogu poboljšati iskustvenim metodama razvijenim u dugogodišnjoj praksi hidrodinamičkih mjerenja iz naftnog inženjerstva. Rješenje jednadžbe difuzije za opis promjene tlaka za vrijeme provođenja protočnog testa u hidrodinamičkim mjerenjima glasi:

$$p(r,t) = p_i - \frac{Q\mu}{2\pi kh}\left\{-\frac{1}{2}Ei\left(-\frac{\phi\mu c_t r^2}{4kt}\right)\right\} \quad . \tag{4-3}$$

U primijenjenoj termogeologiji, rješenje jednadžbe difuzije za slučaj provođenja TRT-a, odnosno zagrijavanja tla:

$$T(r_b,t)_{TRT} = T_i + \frac{q'}{2\pi\lambda}\left\{\frac{1}{2}Ei\left(\frac{r_b^2}{4\alpha t}\right)\right\} = T_i + \frac{q'}{4\pi\lambda}\left\{Ei\left(\frac{r_b^2}{4\alpha t}\right)\right\} \ . \tag{4-4}$$

Za slučaj realnog rada sustava za iskorištavanje plitkih geotermalnih resursa, odnosno pothlađivanja tla zbog pridobivanja topline uz pomoć dizalice topline, rješenje jednadžbe difuzije glasi:

$$T(r_b,t)_{D.T.} = T_i + \frac{q'}{2\pi\lambda}\left\{-\frac{1}{2}Ei\left(\frac{r_b^2}{4\alpha t}\right)\right\} = T_i - \frac{q'}{4\pi\lambda}\left\{Ei\left(\frac{r_b^2}{4\alpha t}\right)\right\}. \tag{4-5}$$

U navedenim jednadžbama, *Ei* je oznaka za funkciju eksponencijalnog integrala čije se rješenje može raspisati kao:

$$-Ei(-x) = \int_x^\infty \frac{e^u}{u}du \ , \tag{4-6}$$

gdje u slučaju vrijednosti funkcije x < 0.02, odnosno kad je izraz u jednadžbi (4-5), $\left(\frac{4\alpha t}{r_b^2}\right) > 50$, vrijednost eksponencijalnog integrala može se aproksimirati s funkcijom prirodnog logaritma uz grešku manju od 0,6% (Lee, 1982). Tad aproksimirana jednakost glasi:

$$-Ei(-x) \cong -\ln(\gamma x) \cong -\ln(e^\gamma x) \cong \ln\left(\frac{1}{x}\right) - 0.5772 \quad . \tag{4-7}$$

Oznaka γ u prethodnoj jednadžbi označava Eulerovu konstantu koja iznosi 0.5772. S obzirom na navedenu aproksimaciju, rješenja jednadžbe difuzije za provođenje TRT-s, odnosno pridobivanja toplinske energije iz tla pomoću dizalice topline, mogu se raspisati kao:

$$T(r_b,t)_{TRT} = T_i - \frac{q'}{4\pi\lambda}\ln\left(\frac{e^\gamma r_b^2}{4\alpha t}\right) = T_i - \frac{q'}{4\pi\lambda}\left(\ln\frac{r_b^2}{4\alpha t} + 0.5772\right) = T_i - \frac{q'}{4\pi\lambda}\left(\ln\frac{r_b^2}{4\alpha t} - 0.8097\right)$$

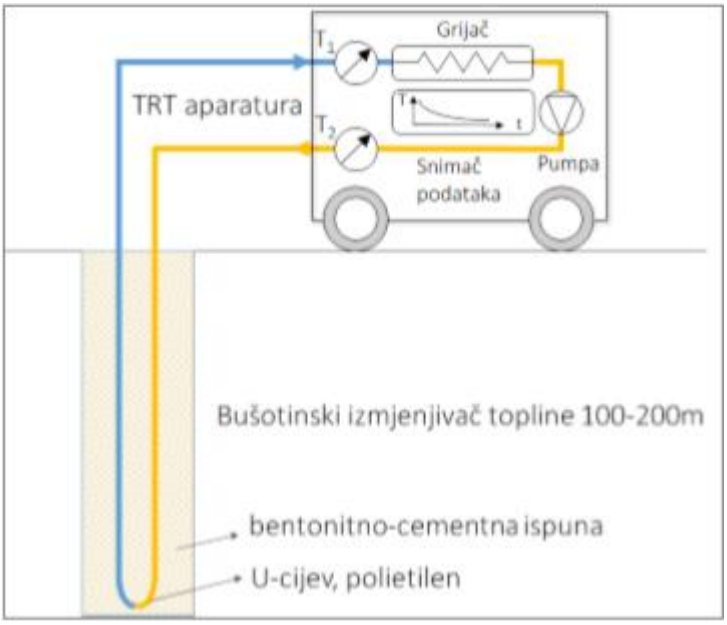
(4-8)

$$T(r_b,t)_{D.T.} = T_i + \frac{q'}{4\pi\lambda}\ln\left(\frac{e^\gamma r_b^2}{4\alpha t}\right) = T_i + \frac{q'}{4\pi\lambda}\left(\ln\frac{r_b^2}{4\alpha t} + 0.5772\right) = T_i + \frac{q'}{4\pi\lambda}\left(\ln\frac{r_b^2}{4\alpha t} - 0.8097\right)$$

(4-9).

5. TEST ODAZIVA TOPLINE

Test se u teoriji može opisati kao promatranje ponašanja i promjena temperature tla u zadanom vremenu uz konstantnu narinutu snagu električnih grijača. Pridobiveni mjereni podaci trenda temperature koriste se za proračun specifične toplinske vodljivosti tla, odnosno efektivne toplinske vodljivosti tla i određivanje statičke temperature tla na određenoj dubini (Kurevija et al., 2014). Navedeni parametri su ključni za buduće projektiranje sustava za iskorištavanje plitke geotermalne energije, broja i dubine postavljenih bušotinskih izmjenjivača topline. Osim toga, TRT služi i za ispitivanje karakteristika i efikasnosti već postavljenih sustava Aparatura za izvođenje TRT-a sastoji se od kompleta električnih grijača koji služe za održavanje konstantnog narinutog toplinskog pulsa tijekom perioda mjerenja. Grijači su najčešće spojeni na lokalnu električnu mrežu, ili u manjem broju slučajeva TRT aparatura sadrži i vlastit generator što rezultira manjim oscilacijama napona nego u prvom slučaju, a time i manjim oscilacijama u snazi električnih grijača. TRT se smatra uspješno provedenim za daljnju procjenu podataka o svojstvima tla ukoliko se toplinski uvjet održava na barem 95% pouzdanosti narinute toplinske snage iz čega slijedi da su provedena mjerenja vjerodostojna za daljnje proračune (ASHRAE, 2011). Osim grijača, u sklopu aparature za mjerenje nalazi se i cirkulacijska pumpa, mjerač protoka, temperaturni senzor i podatkovni snimač. Dijelovi aparature prikazani su na slici 4-1. Bitan preduvjet za pridobivanje pouzdanih podataka iz mjerenja je povezivanje TRT aparature čvrstom i plinotjesnom vezom s bušotinskim izmjenjivačem topline. Površinske cijevi koje povezuju aparaturu i bušotinski izmjenjivač trebaju biti što kraće i toplinski izolirane da bi se umanjio utjecaj atmosferskih čimbenika.

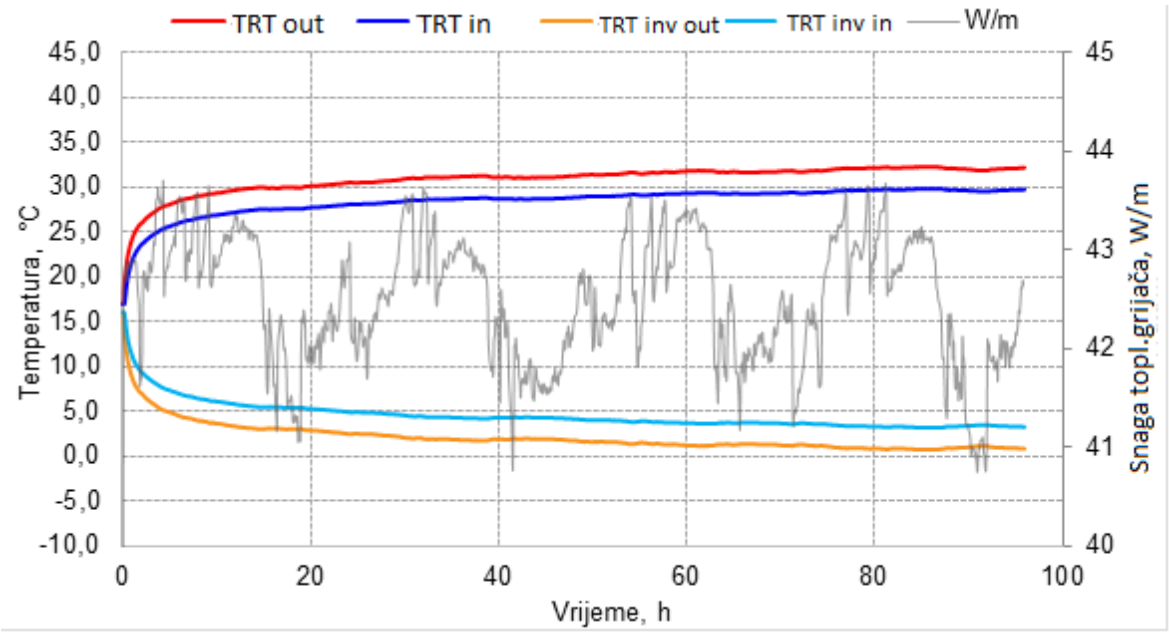


Slika 5-1. Osnovni dijelovi aparature za provođenje TRT mjerenja na bušotinskom izmjenjivaču topline (vlastita grafika)

Potrebna duljina trajanja TRT često je predmet diskusije u različitim priručnicima i znanstvenim radovima. Prema ASHRAE priručniku iz 2011. godine, TRT bi trebao trajati barem 36 h ili 48 h. Prednost duljeg perioda mjerenja je u mogućnosti prepoznavanja pravilnih dnevnih fluktuacija koje uzrokuju vanjski čimbenici. Ipak, važno je u obzir uzeti specifičnost svojstava tla na lokaciji na kojoj se izvodi mjerenje i kvalitetu cementne ispune pri postavljanju bušotinskih izmjenjivača topline, pa mnogi izvori poput I. Zervantonakis i M. Reuss (2006) s Bavarskog instituta za primijenjenu energiju preporučaju duljinu TRT od 4 dana, odnosno 96 sati u slučaju mjerenja na neistraženim lokacijama.

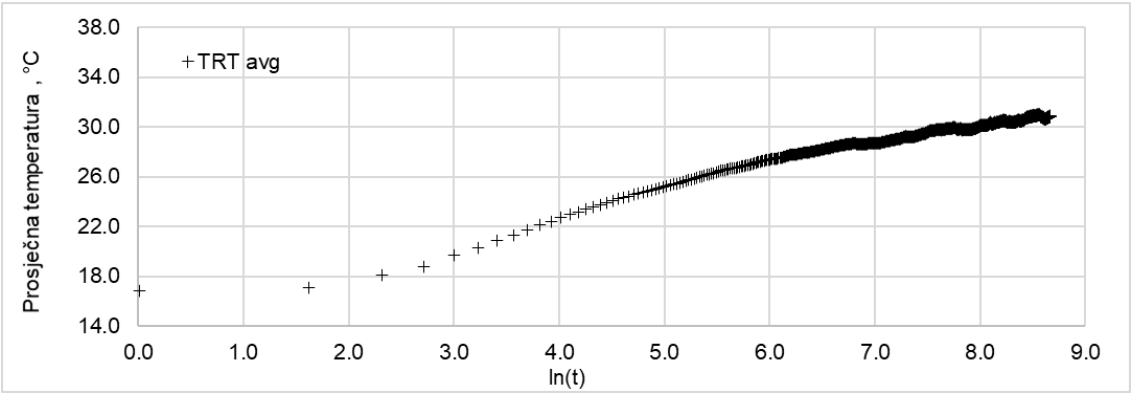
5.1. Konvencionalna metoda određivanja toplinske vodljivosti tla

Tipski izgled mjerenih podataka dobivenih provođenjem TRT-a prikazan je na slici 5-2. Iz podataka se razaznaje period neustaljenog stanja širenja toplinskog toka (engl. *Unstedy State Heat Flow, USS*) i poluustaljenog, odnosno ustaljenog stanja (engl. *Semi-steady State Heat Flow, SSS*). Uzrok početnog USS perioda su bušotinski toplinski otpori (engl. *Borehole Thermal Resistance, Rb*) koje toplinski tok mora savladati prije nego što razvoj temperature postane isključivo funkcija toplinske vodljivosti tla.



Slika 5-2. Tipski prikaz dobivenih podataka nakon višesatnog TRT mjerenja

Siva linija na slici 5-2. prikazuje oscilacije napona u lokalnoj električnoj mreži na koju su spojeni grijači TRT aparature. Inverzna krivulja na prikazanom grafu konstruirana je metodom zrcaljenja i predstavlja uvid u ponašanje temperature tla prilikom realnog rada sustava, to jest crpljenja toplinske snage iz tla. Početna statička temperatura tla određuje se za vrijeme početnog cirkuliranja radnog fluida u bušotinskom izmjenjivaču bez upaljenih grijača, koje se provodi minimalno 15 minuta. Određivanje perioda polu-ustaljenog/ustaljenog stanja širenja toplinskog toka ključno je za određivanje pouzdane vrijednosti toplinske vodljivosti. Za početak je potrebno prikazati srednju vrijednost temperature radnog fluida u odnosu s funkcijom prirodnog logaritma vremena (slika 5-3.).



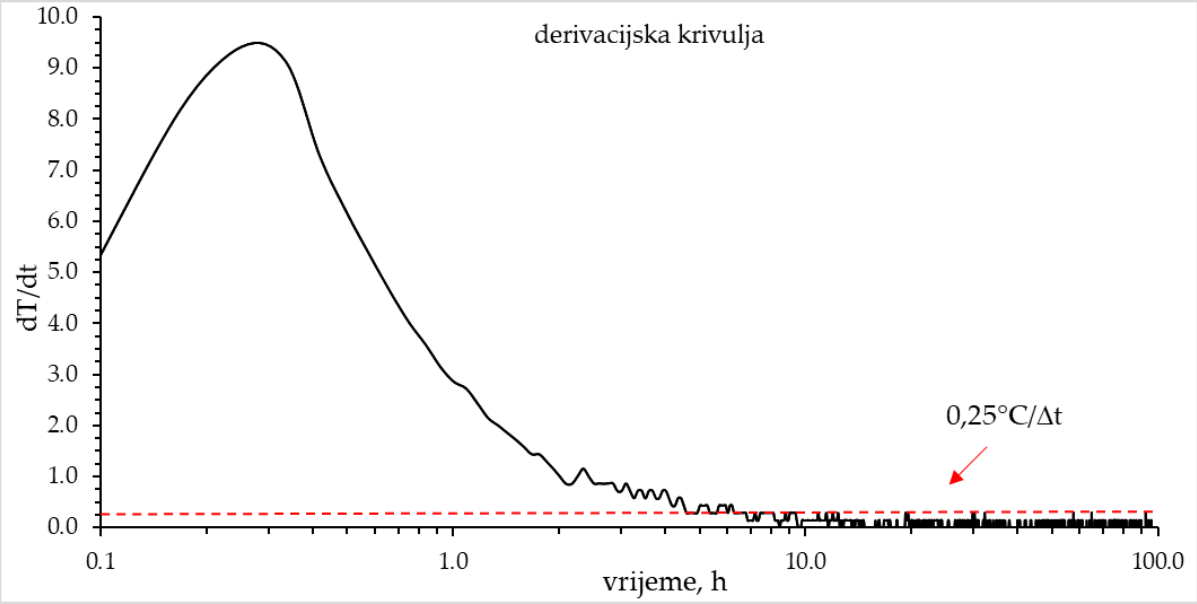
Slika 5-3. Odnos logaritamske funkcije vremena provođenja TRT-a i razvoja prosječne temperature radnog fluida u bušotinskom izmjenjivaču

Prvi proračuni izvedeni su na Sveučilištu Luleå u Švedskoj, u sklopu doktorske disertacije (Gehlin, 2002), prema kojima je potrebno procijeniti vrijednost toplinskog difuziviteta tla prije određivanja perioda poluustaljenog stanja širenja toplinskog toka. Prema Gehlin (2002), trajanje neustaljenog stanja se može izračunati prema izrazu:

$$\frac{\alpha t}{r^2} > 5 \ , \tag{5-1}$$

odnosno $t > \frac{5r^2}{\alpha}$.

Potreba za pretpostavkom toplinskog difuziviteta, α, iz kataloških vrijednosti prema procijenjenom sastavu tla opasnost od greške od čak 10%. Naizgled ne toliko značajan postotak odražava se puno većom sumiranom greškom prilikom proračuna toplinske vodljivosti. Preciznija metoda derivacijske krivulje koja potječe iz naftnog inženjerstva predstavljena je u nekoliko dosad objavljenih znanstvenih članaka (Kurevija et al, 2018a, 2018b, 2018c). Metoda derivacijske krivulje u odnos stavlja promjenu prosječne temperature radnog fluida u funkciji vremena i ukupno proteklo vrijeme. Tipski prikaz primjene metode derivacijske krivulje na podatke dobivene iz TRT mjerenja prikazan je na slici 5-4. Iz slike je lako razaznati točan period u kojem promjena temperature u vremenu postaje toliko mala, najčešće je arbitrarno odabrana vrijednost promjene 0,25°C u periodu od 10 minuta koliko traje cirkulacijski puls, da se može smatrati zanemarivom i zaključiti da je započeo period ustaljenog stanja širenja toplinskog toka.

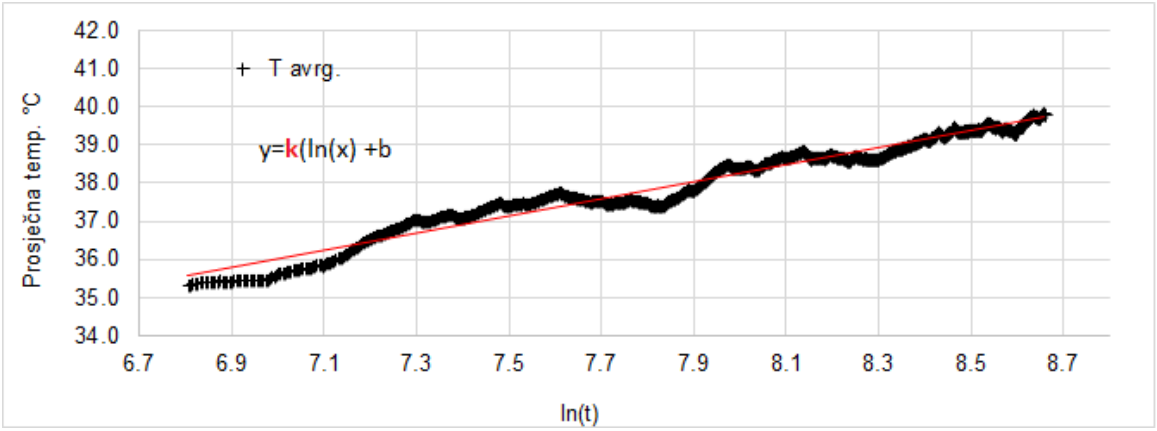


Slika 5-4. Prikaz tipskog modela derivacijske krivulje i odabranog prijelaza iz neustaljenog u poluustaljeni period širenja toplinskog toka

Grafički prikaz metode derivacijske krivulje prikazane na slici 5-4 može se analitički opisati jednadžbom derivacije tangente u zadanoj točki (5-2) koja opisuje promjenu nagiba, odnosno vrijednosti u slučaju metode derivacijske krivulje (Chaudhry, 2003). Bitan preduvjet je ostvaren gust broj točaka mjerenja s malim razmakom, što je ispunjeno u dugotrajnim TRT mjerenjima gdje se promjena temperature registrira unutar svakog desetominutnog cirkulacijskog toka.

$$\left(\frac{dy}{dx}\right)_A = \frac{\left(\frac{y_1}{x_1}x_2 + \frac{y_2}{x_2}x_1\right)}{x_1 + x_2} \quad . \tag{5-2}$$

Nakon preciznog određivanja početka ustaljenog širenja toplinskog toka, prethodno vrijeme mjerenja se zanemaruje u određivanju toplinske vodljivosti tla. Stavljam u odnos srednje vrijednosti temperature radnog fluida i logaritamske funkcije vremena za poluustaljeni period (slika 5-5.) moguće je odrediti nagib dobivene linije, *k*, koji se uvrštava u formulu za izračun vrijednosti toplinske vodljivosti.



Slika 5-5. Odnos logaritamske funkcije vremena provođenja TRT-a i razvoja prosječne temperature radnog fluida za vrijeme ustaljenog perioda širenja toplinskog toka

Nagib linije, odnosno pravca, na prikazanom grafu može se odrediti primjenom *Trendline* funkcije u *MS Excel* platformi. Proračun toplinske vodljivosti tad se može izraziti pomoću jednadžbe (5-3) kao:

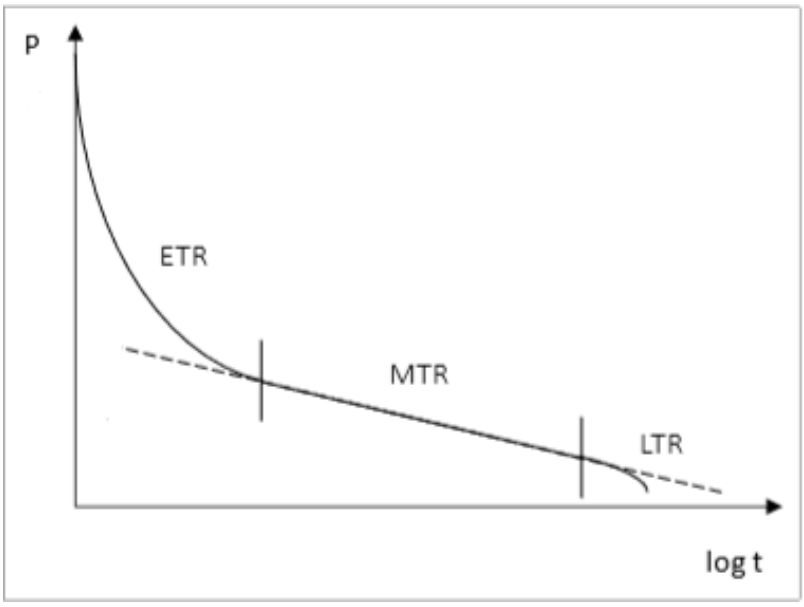
$$\lambda = \frac{q'}{4\pi k} \tag{5-3}$$

s obzirom da je u ustaljenom periodu širenja toplinskog toka za vrijeme TRT-a, razvoj temperature funkcija toplinske vodljivosti tla.

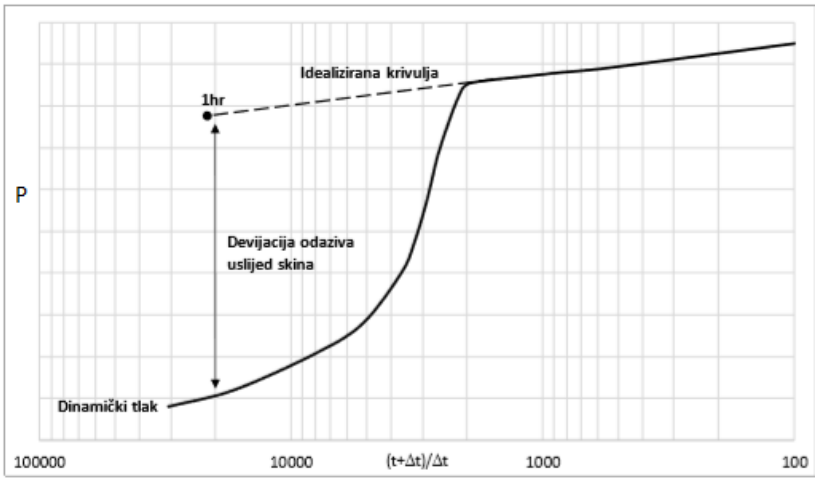
5.2. Inovativna metoda određivanja toplinske vodljivosti tla

Utjecaj čimbenika koji smanjuju pouzdanost podataka dobivenih TRT mjerenjem može se umanjiti primjenom terenskih metoda razvijenih u naftnom inženjerstvu, točnije hidrodinamičkim mjerenjima, te hidrologiji (Matthews i Russell, 1967; Raymond et al., 2011). Prema principu provođenja mjerenja, TRT je analogan protočnom testu (engl. *flow test*) u hidrodinamičkim mjerenjima gdje se promatra ponašanje tlaka za vrijeme konstantne stope proizvodnje fluida. Prema terenskim iskustvima taj test se rijetko upotrebljava za proračun hidrauličkih svojstava sredine u kojoj je izrađena bušotina jer je teško održavati stopu proizvodnje fluida konstantnom kroz dulji period vremena. Za tu svrhu se u najvećem broju slučajeva izvodi test oporavka tlaka (engl. *pressure buildup test*). Izvođenje testa uključuje prethodnu konstantnu proizvodnju nakon čega se bušotina zatvara i slijedi mjerenje oporavka tlaka prema početnim statičkim vrijednostima. Iz dobivenih podataka može se odrediti i *skin faktor* formacije, odnosno dodatni pad tlaka uzrokovan oštećenjem prilikom bušenja ili popratnim efektima proizvodnje. Tipski prikaz razvoja tlaka za vrijeme opisanog protočnog testa i testa porasta tlaka prikazan je na slici 5-6. U oba primjera je moguće razaznati tri perioda za vrijeme mjerenja kad je riječ o realni podacima izvođenja testa. Rani period, ETR (engl. *early time region*), je pod utjecajem pojave pražnjenja bušotine do koje dolazi jer je količina crpljenja iz bušotine veća od količine fluida koji ulazi iz sloja u bušotinu. Ovaj fenomen je u hidrodinamici povezan sa stlačivosti samog fluida unutar bušotine te otpuštanjem fluida na površini uslijed njegovog pirenja uslijed pada tlaka. Pojava pražnjenja bušotine će trajati sve dok se ne uspostavi ravnoteža i dotad konstantan protok neće biti postignut, što rezultira odstupanjem od ravne linije na polulogaritamskom grafu zavisnosti dinamičkog tlaka o vremenu (Witte, 2001). MRT period (engl *middle time region*) opisuje ustaljeno stanje protoka fluida gdje je savladan skin efekt i ponašanje tlaka ovisi isključivo o hidrodinamičkim svojstvima sredine u kojoj se nalazi fluid, točnije propusnosti formacije. Podaci iz tog perioda mjerenja se koriste za proračun hidrodinamičkih svojstava i stupnja oštećenosti pribušotinske zone. Posljednji period koji se može razaznati LTR (engl. *late time region*) na prikazu podataka realnog mjerenja označava da je polumjer mjerenja dosegao granice ležišta ili područje značajne heterogenosti.

a)



b)



Slika 5-6. Ponašanje tlaka za vrijeme hidrodinamičkih testova u naftnom inženjerstvu a) protočni test, b) test porasta tlaka

Opis snimljenog linijskog odnosa pada tlaka i logaritamske funkcije vremena za vrijeme srednjeg perioda mjerenja protočnog testa dan je jednadžbom (4-3). S obzirom da funkcija eksponencijalnog integrala iz rješenja parcijalne diferencijalne jednadžbe može biti opisana funkcijom prirodnog logaritma prema postupku opisanom jednadžbama (4-6) i (4-7), za potrebe prikaza mjerenja u hidrodinamičkim testovima nužno je navedeno rješenje za opis kretanja tlaka opisati pomoću funkcije dekadskog logaritma. Pripadni koeficijenti tad slijede iz pravila jednakosti:

$\log_a b = \dfrac{\log_c b}{\log_c a}$, uz uvjet da je $(a > 0, b > 0, c > 0, a \neq 1, c \neq 1)$,

tad je:

$$\ln(x) = \log_e x = \frac{\log_{10} x}{\log_{10} e} = \frac{\log_{10} x}{0,4343} , \tag{5-4}$$

odnosno $\ln(x) = 2,303\log(x)$.

Kod provođenja TRT-a u termogeologiji, MTR odgovara periodu ustaljenog širenja toplinskog toka, a LTR interferenciji zbog nailaska toplinskog toka na područje djelovanja susjednog bušotinskog izmjenjivača.

U naftnom inženjerstvu se promjena protoka iz bušotine, odnosno prinosa bušotine, prikazuje uz pomoć matematičkog principa superpozicije (Lee, 1982). Uz izraz (4-3) koji opisuje ponašanje tlaka u bušotini za vrijeme konstantnog protoka i uvrštavanje aproksimacije eksponencijalnog integrala s prirodnim logaritmom (4-7), moguće je prikazati vrijednost pada tlaka u bušotini pri završetku vremena proizvodnje t_p za vrijeme protočnog testa:

$$p_i - p_{wf} = -\frac{Q\mu}{4\pi kh}\left\{\ln\left(\frac{e^{\gamma} r^2}{4\eta t_p}\right)\right\} \tag{5-5}$$

p_{wf} = dinamički tlak na dnu bušotine (Pa).

U slučaju testa porasta tlaka možemo zasebno promatrati dva različita stanja protoka iz bušotine u kojem stanje zatvorene bušotine prikazujemo kao izostanak protoka, a vrijednost dinamičkog tlaka zamjenjujemo sa statičkim tlakom p_{ws} na kraju vremena u kojem je bušotina bila zatvorena, Δt ,preko izraza:

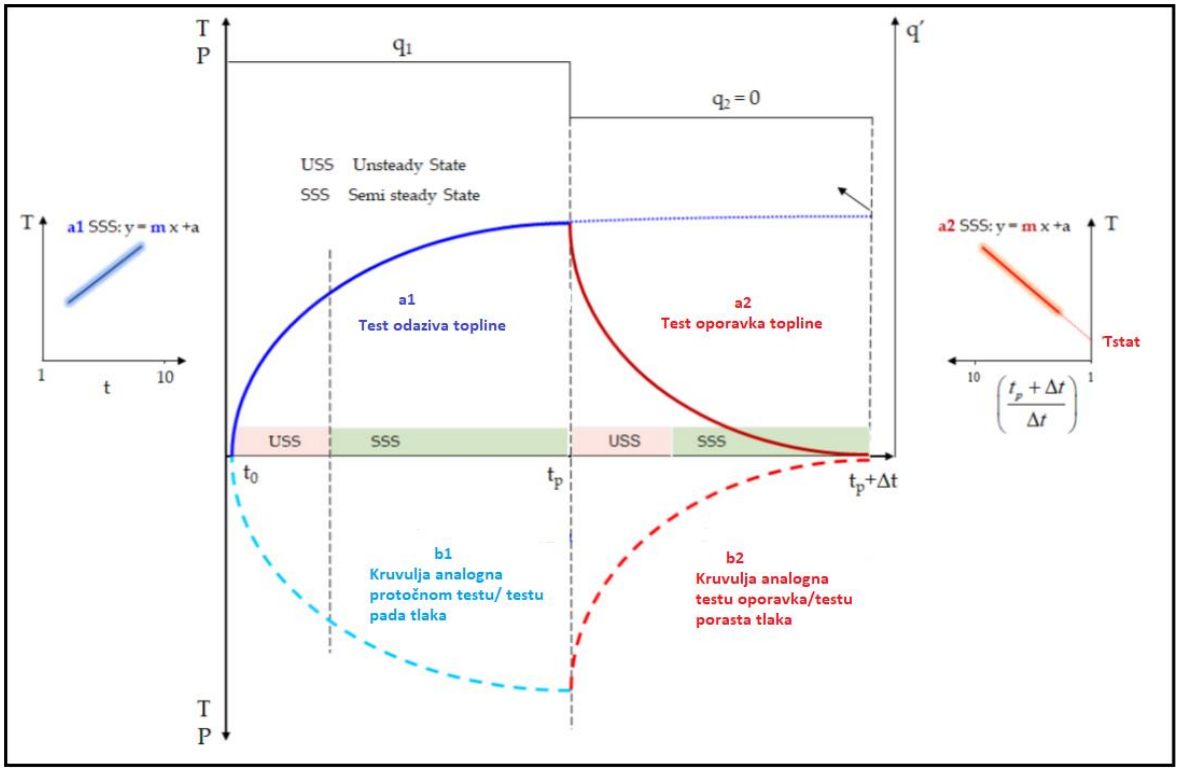
$$p_i - p_{ws} = -\frac{Q\mu}{4\pi kh}\left\{\ln\left(\frac{e^{\gamma} r^2}{4\eta(t_p + \Delta t)}\right)\right\} + \frac{Q\mu}{4\pi kh}\left\{\ln\left(\frac{e^{\gamma} r^2}{4\eta\Delta t}\right)\right\} \tag{5-6}$$

$$p_{ws} = p_i - \frac{Q\mu}{4\pi kh}\ln\left(\frac{t_p + \Delta t}{\Delta t}\right) .$$

Uzevši u obzir konverziju iz prirodnog u dekadski logaritam, koja je potrebna da bi se kretanje tlaka za vrijeme testa porasta tlaka moglo prikazati na polu-logaritamskom mjerilu (5-4) prethodni izvod postaje:

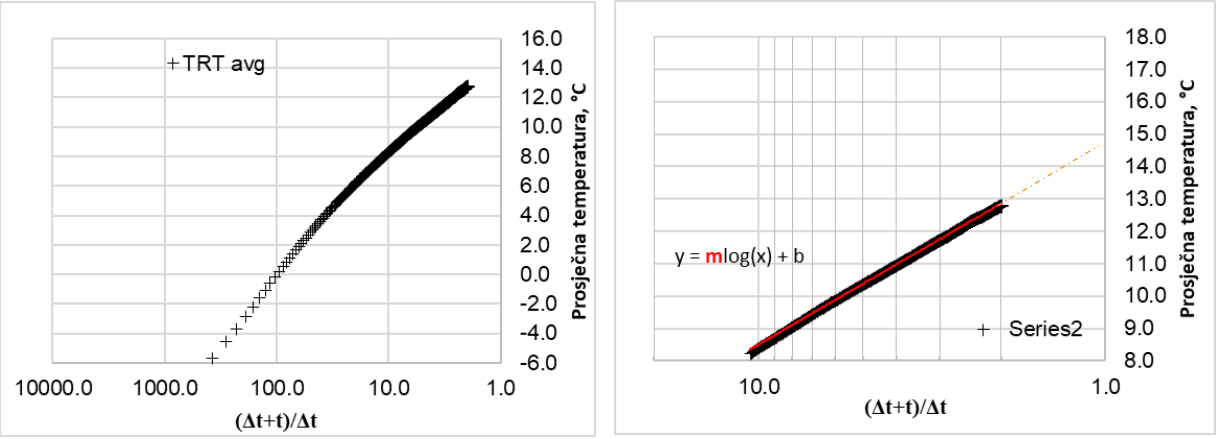
$$p_{ws} = p_i - 2.303\frac{Q\mu}{4\pi kh}\log\left(\frac{t_p + \Delta t}{\Delta t}\right) \tag{5-7}$$

Uz test porasta tlak primjenjuje se Hornerova metoda za proračun propusnosti formacije i skin faktora iz postproduktivnog vremena. Izmjerena promjena tlaka se stavlja u odnos s karakterističnom veličinom vremena tzv. Hornerovim vremenom. U izrazu $(t_p + \Delta t) / \Delta t$, t_p označava vrijeme trajanja konstantne proizvodnje fluida prije zatvaranja bušotine dok Δt označava vrijeme proteklo nakon zatvaranja bušotine. Preduvjet za primjenu metode je određeno trajanje posljednjeg konstantnog protočnog uvjeta prije zatvaranja bušotine i trajanje perioda u kojem je bušotina zatvorena. Primjena Hornerove metode se bazira na raspoznavanju dijela krivulje gdje je odnos između oporavka tlaka uslijed zatvaranja bušotine i Hornerovog vremena na polu-logaritamskom dijagramu opisan linijskim odnosom. Karakterističan dijagram s podacima mjerenja testa porasta tlaka na kojem se primjenjuje Hornerova metoda prikazuje rast veličine Hornerovog vremena s desna na lijevo (Horner, 1951). Cilj je odrediti nagib linije, *m*, koja opisuje razvoj tlaka za vrijeme jednog logaritamskog ciklusa jer je izravno povezan s veličinom propusnosti i oštećenja formacije. Analogna inovativna metoda testiranja u termogeologiji bazira se na promatranju oporavka temperature prema statičkoj vrijednosti nakon provedenog TRT-a. Preporučeno trajanje tzv. testa oporavka je duljina trajanja provedenog TRT-a radi referentne usporedbe dobivenih vrijednosti toplinskih svojstava tla. Na slici 5-7. prikazan je tipski izgled dobivenih mjerenih podataka nakon višesatnog TRT-a i testa oporavka. Promatrajući inverzne zrcalne krivulje mjerenim podacima, odnosno kako bi se razvoj temperature ponašao za vrijeme realnog rada plitkog geotermalnog sustava uz pridobivanje topline i promatranje oporavka, moguće je uočiti sukladnost inverzne krivulje oporavka temperature i krivulje koja odgovara testu oporavka tlaka. To upućuje na moguću primjenu Hornerove metode na krivulju dobivenu iz mjerenih podataka za vrijeme testa oporavka temperature.



Slika 5-7. Analogija izgleda dobivenih krivulja mjerenih podataka za vrijeme provođenja hidrodinamičkih i termogeoloških testova

Određivanje nagiba *m* kod primjene Hornerove metode uključuje prikaz odnosa prosječne temperature radnog fluida u bušotinskom izmjenjivaču i protekle funkcije Hornerovog vremena kao što je tipski prikazano na slici 5-8 uz interpretaciju krivulje *a2* na desnoj strani. Detaljan postupak prikazan je na slici 5-8. Dok je hidrodinamičkim testovima kod primjene Hornerove metode u sklopu testa porasta tlaka karakteristično da je vrijednost nagiba *m* uvijek pozitivna, u slučaju primjene metode na test oporavka temperature u termogeologiji situacija je obrnuta. Uz početni poremećaj i porast statičke vrijednosti temperature tla za vrijeme klasičnog TRT-a, vrijednost temperature pada za vrijeme oporavka i rezultira padajućim trendom pravca na polu-logaritamskog dijagramu. Stoga je vrijednost nagiba *m* u inovativnoj primjeni Hornerove metode negativna. Odabir pouzdanog dijela podataka u kojem prevladava polu ustaljeno i ustaljeno širenje toplinskog toka selektira se pomoću metode derivacijske krivulje opisane u prethodnom poglavlju. S obzirom da se test oporavka temperature provodi uz ugašene električne grijače, trajanje početnog prijelaznog, neustaljenog pirenja toplinskog toka bit će kraće nego u slučaju klasičnog TRT-a zbog izostajanja utjecaja fluktuacija u lokalnoj električnoj mreži na mjerene podatke.



Slika 5-8. Razvoj prosječne temperature bušotinskog fluida za vrijeme testa oporavka temperature i linijski odnos za vrijeme ustaljenog stanja širenja toplinskog toka

Odabrani dio mjerenih podataka za interpretaciju može se linijski prikazati pomoću *trendline* funkcije u *MS Excelu*. Razlika postignute temperature na kraju klasičnog TRT-a i mjerene temperature za vrijeme testa oporavka, označenom s krivuljom *a2* na slici 5-7, s obzirom na analogiju s hidrodinamičkim testom porasta tlaka, može se opisati jednadžbom:

$$\Delta T_{EST} = -2,303\frac{-q'}{4\pi\lambda}\log\left(\frac{t_p+\Delta t}{\Delta t}\right) \qquad (5\text{-}8)$$

$$\Delta T_{EST} = -m\log\left(\frac{t_p+\Delta t}{\Delta t}\right).$$

Koeficijent *m*, nagib krivulje u polulogaritamskom dijagramu, označava promjenu temperature u jednom logaritamskom ciklusu Hornernovog dijagrama:

$m = -2,303\frac{q'}{4\pi\lambda}$, odnosno toplinska vodljivost se može izračunati kao $\lambda = -\frac{m4\pi}{2,303q'}$.

Ekstrapolacijom *trendline* linije na polulogaritamskom dijagramu mjerenih podataka do vrijednosti funkcije Hornerovog vremena jednake jedinici, odnosno prikazom dovoljno dugog vremena promatranja temperature nakon gašenja grijača, moguće je izravno očitati vrijednost statičke temperature tla na odabranoj dubini bušotinskog izmjenjivača. Time je omogućena provjera vrijednosti statičke temperature očitanih iz početne cirkulacije bušotinskog radnog fluida kod provođenja TRT-a bez upaljenih grijača čija je točnost diskutabilna zbog utjecaja trenja fluida i rada pumpe (Soldo et al., 2016b).

5.3. Određivanje veličine toplinskog otpora bušotinskog izmjenjivača

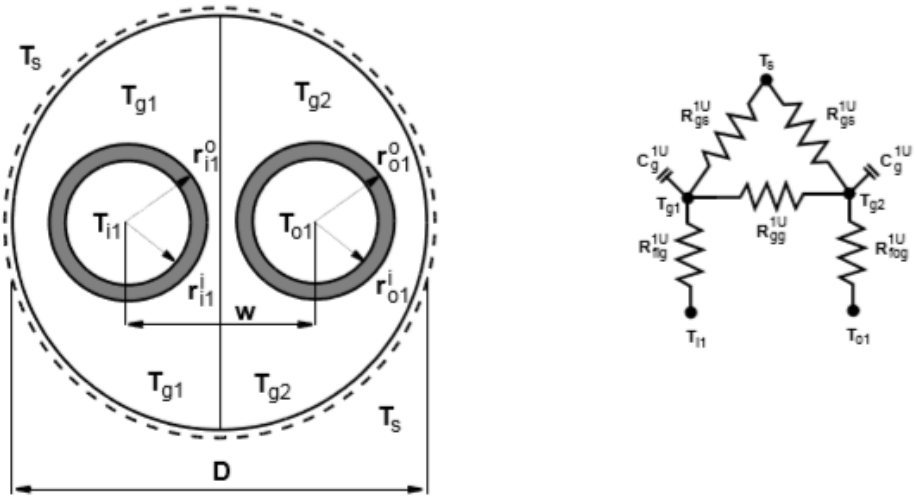
Toplinski otpor, *R*, često se opisuju i kao toplinska barijera bušotinskih izmjenjivača topline. Veličina toplinskog otpora može se objasniti kao veličina razlike između temperature bušotinskog radnog fluida i stjenke bušotine. Razlika je uzrokovana utjecajem materijala polietilenskih cijevi visoke gustoće koje se koriste za izradu bušotinskih izmjenjivača i cementne kaše koja je, osim u slučajevima posebnog dizajna uz dodatak bentonita, manje toplinske vodljivosti od tla. Savladavanjem te toplinske barijere započinje ustaljeno širenje toplinskog toka. Prilikom TRT-a postojanje toplinskog otpora vidljivo je iz razlike ulazne temperature fluida u bušotinski izmjenjivač topline i izlazne temperature iz izmjenjivača, gdje je fluid dio topline predao okolini. Razlika u temperaturi može iznositi i do 7-8°C. (Koeing, 2015). Prema Al-Khouryu i suradnicima (2005), a kasnije i prema analitičkoj razradi efekta toplinskih otpora u priručniku o primjeni metode konačnih elemenata za sustav bušotinskih izmjenjivača (Diersch et al., 2011) ovisno o vrsti bušotinskih izmjenjivača, efekt toplinskog otpora može se podijeliti na nekoliko komponenti. Pretpostavka koju treba uzeti u obzir je da je cementna kaša kojom je sustav ispunjen homogeni materijal.

Za slučaj U ili 2U tipa bušotinskih izmjenjivača, toplinski otpor se može podijeliti na :

a) Komponentu toplinskog otpora do koje dolazi uslijed prijenosa topline između stjenki svake od polietilenskih cijevi i cementne kaše,

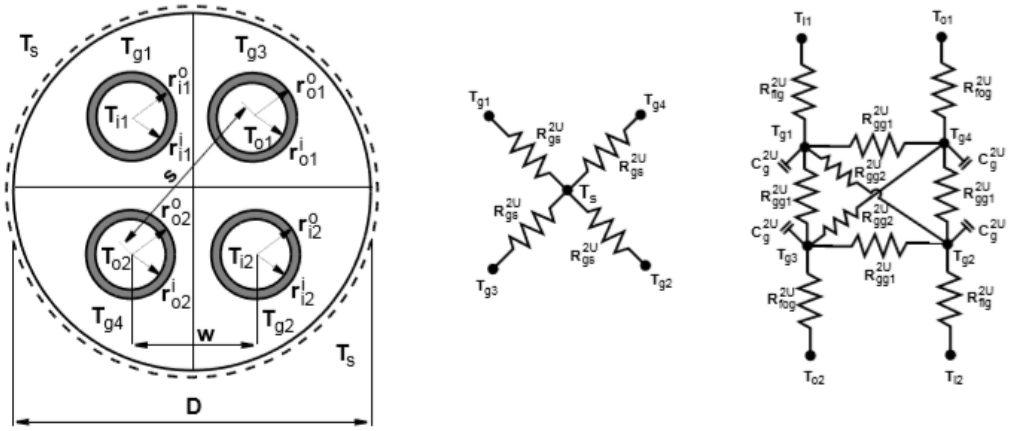
b) Komponentu toplinskog otpora uslijed prijenosa topline između cementne kaše i tla.

To znači da se u slučaju U izmjenjivača, toplinski otpor sastoji od četiri komponente (slika 5-9.), uzlazna cijev (f_o1) i silazna cijev (f_i1) kojima cirkulira fluid (engl. *fluid outlet – fluid inlet*) te cementna kaša koja se može podijeliti na dvije cjeline s obzirom na utjecaj radijalnog prijenosa topline iz cijevi (*g1* i *g2*). Svaka od cjelina cementne kaše sudjeluje u prijenosu topline s tlom (engl. *soil, s*).



Slika 5-9. Komponente toplinskog otpora kod konfiguracije U izmjenjivača (Diersch et al., 2011)

Slijedeći isti pristup, u slučaju 2U konfiguracije toplinski otpor se može podijeliti na osam komponenata s obzirom na dvije uzlazne (f_o1 i f_o2) i dvije silazne cijevi (f_i1 i f_i2) kojima cirkulira fluid te odgovarajuće četiri cjeline cementne kaše preko kojih dolazi do prijenosa topline s tlom (*g1*,*g2*,*g3* i *g4*). navedene komponente prikazane su na slici 5-10.



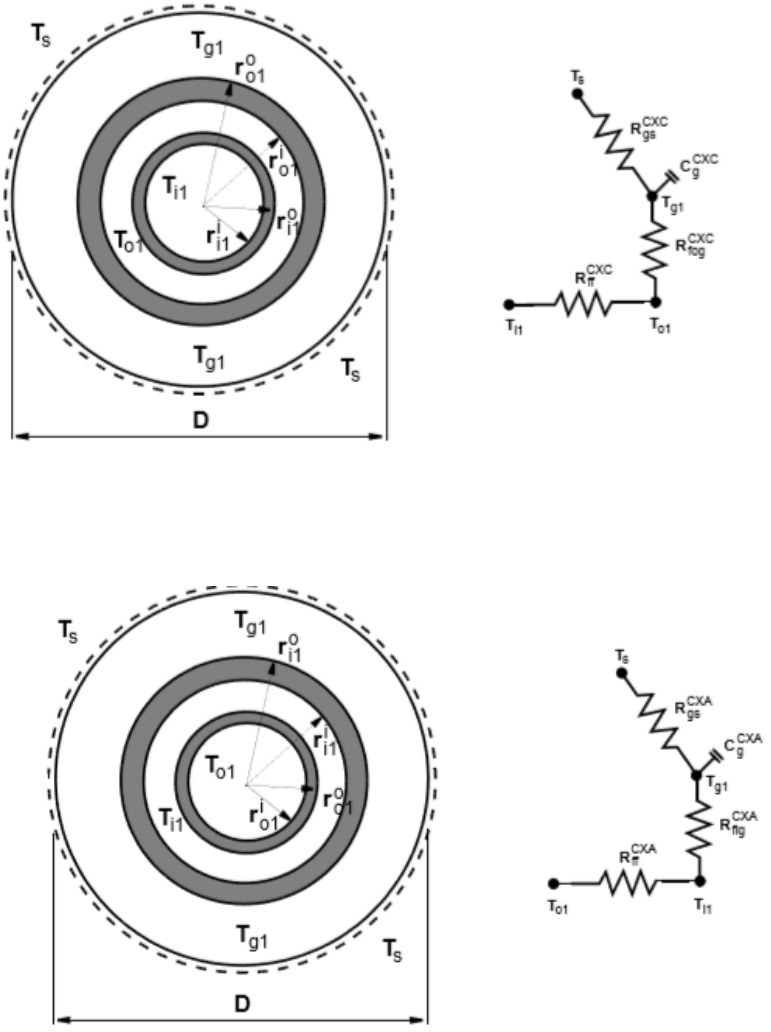
Slika 5-10. Komponente toplinskog otpora kod konfiguracije U izmjenjivača (Diersch et al., 2011)

Za slučaj koaksijalnih bušotinskih izmjenjivača topline, toplinski otpor se može podijeliti na:

a) Komponentu toplinskog otpora koja nastaje uslijed advektivnog prijenosa topline u cijevi i između dvije koaksijalne cijevi;
b) Komponentu toplinskog otpora do koje dolazi uslijed prijenosa topline između vanjske polietilenske cijevi i cementne kaše;

c) Komponentu toplinskog otpora do koje dolazi uslijed prijenosa topline između cementne kaše i stijenske mase koja okružuje bušotinski izmjenjivač (tlo).

Cementnu kašu je u ovom slučaju potrebno razmotriti kao jednu cjelinu. Do varijacija u toplinskog otporu dolazi uslijed odabira načina cirkulacije radnog fluida kroz koaksijalni sustav cijevi, odnosno koristi li se središnja cijev ili prstenasti prostor za silazni tok fluida (*i1*) ili uzlazni tok fluida (*o2*). Na slici 5-11. prikazana je podjela komponenti bušotinskog otpora za oba slučaja cirkulacije.



Slika 5-11. Komponente toplinskog otpora kod koaksijalne konstrukcije toplinskih izmjenjivača (Diersch et al., 2011)

Toplinski otpor može se iskazati preko izraza:

$$R_b = \frac{\Delta T}{q'} \tag{5-9}$$

gdje ΔT predstavlja razliku temperature radnog fluida i stjenke bušotine. Savladavanjem navedene razlike u temperaturi započinje ustaljeno stanje širenja toplinskog toka. Efekt toplinskog otpora koji uzrokuje temperaturnu razliku na stjenkama bušotinskog izmjenjivača može se aproksimirati sa *skin* efektom u naftnom inženjerstvu koji uzrokuje dodatni pad tlaka u pribušotinskoj zoni. Uz poznatu vrijednost toplinske vodljivosti moguće iz obavljenih hidrodinamičkih testova (testa porasta tlaka) moguće je iskazati vrijednost pada tlaka uzrokovanog skin efektom kao:

$$\begin{aligned} \Delta p_{skin} &= s\left(\frac{Q\mu}{2\pi kh}\right) \\ s &= \frac{\Delta p_{skin}}{\left(\frac{Q\mu}{2\pi kh}\right)} \end{aligned} \tag{5-10}$$

Slijedeći već opisane sličnosti u metodama i određivanju parametara, razlika temperature radnog fluida i stjenke bušotine kod bušotinskih izmjenjivača topline se nakon određivanja toplinske vodljivosti tla može kumulativno prikazati kao *skin* faktor izrazom:

$$\Delta T_{skin} = s\left(\frac{q'}{2\pi\lambda}\right) = Rb \times q' \ . \tag{5-11}$$

U realnim uvjetima rada naftnih bušotina, pa tako i bušotinskih izmjenjivača, potrebno je uzeti u obzir utjecaj *skin* efekta koji utječe na smanjenje efikasnosti sustava. Dodatan pad tlaka uzrokovan *skin* efektom (5-10) potrebno je dodati izrazu (5-6) čim je realna vrijednost tlaka za vrijeme proizvodnje jednaka:

$$\begin{aligned} p_{wf} &= p_i + \frac{Q\mu}{4\pi kh}\ln\left(\frac{e^{\gamma} r^2}{4\eta t}\right) - \Delta p_{skin} \\ p_{wf} &= p_i + \frac{Q\mu}{4\pi kh}\left\{\ln\left(\frac{e^{\gamma} r^2}{4\eta t}\right) - 2s\right\} \end{aligned} \tag{5-12}$$

Slijedeći pravila u izrazu za realni tlak u naftnoj bušotini za vrijeme konstantne stope proizvodnje, moguće je prikazati realnu temperaturu bušotinskog fluida za vrijeme konstantne stope pridobivanja toplinske energije uz korištenje dizalice topline, to jest pohrane toplinske energije za vrijeme izvođenja TRT-a. Opisane izraze u jednadžbama (4-8) i (4-9) potrebno je proširiti s izrazom za karakteristični toplinski otpor uz zadani prinos (5-11). Tad se temperatura za vrijeme pridobivanja topline iz bušotinskih izmjenjivača uz korištenje dizalice topline može prikazati kao:

$$T_{D.T.} = T_i + \frac{q'}{4\pi\lambda}\ln\left(\frac{e^{\gamma}r^2}{4\alpha t}\right) - \Delta T_{skin} = T_i + \frac{q'}{4\pi\lambda}\ln\left(\frac{e^{\gamma}r^2}{4\alpha t}\right) - s\left(\frac{q'}{2\pi\lambda}\right)$$
$$T_{D.T.} = T_i + \frac{q'}{4\pi\lambda}\left(\ln\frac{r^2}{\alpha t} - 0.8097 - 2s\right) \quad (5\text{-}13)$$

Dok se vrijednost porasta inicijalne temperature za prijeme provođenje TRT-a može prikazati pomoću izraza:

$$T_{TRT} = T_i - \frac{q'}{4\pi\lambda}\ln\left(\frac{e^{\gamma}r^2}{4\alpha t}\right) + \Delta T_{skin} = T_i - \frac{q'}{4\pi\lambda}\ln\left(\frac{e^{\gamma}r^2}{4\alpha t}\right) + s\left(\frac{q'}{2\pi\lambda}\right)$$
$$T_{TRT} = T_i - \frac{q'}{4\pi\lambda}\left(\ln\frac{r^2}{\alpha t} - 0.8097 - 2s\right) \quad (5\text{-}14)$$

Vrijednost skin efekta iz interpretacije podataka klasičnog TRT-a može se izraziti iz početnih i krajnjih vrijednosti temperature kako slijedi:

$$s = \frac{1}{2}\ln\left(\frac{e^{\gamma}r^2}{4\alpha t_p}\right) - \frac{\left(T_i - T_p\right)2\pi\lambda}{q'} \quad (5\text{-}15)$$

Razmjer skin efekta moguće je odrediti i pomoću testa porasta tlaka u hidrodinamičkim mjerenjima, primjenom Hornerove metode, na način da se prati razlika između vrijednost tlaka na kraju perioda konstantne proizvodnje i tlaka kratko nakon zatvaranja bušotine dok se on oporavlja prema statičkoj vrijednosti. Prvo je potrebno razmotriti primjenu načela superpozicije za slučaj ponašanja tlaka za vrijeme promjenjivih stopa proizvodnje (5-7). Iste korake moguće je primijeniti na izraz koji opisuje stanje temperature tijekom provođenja TRT-a neposredno nakon gašenja grijača i na kraju perioda mjerenja s ugašenim grijačima (engl. *temperature recovery test*). Navedeni izraz je kombinacija jednadžbe (5-14) i jednadžbe (5-8) kako slijedi:

$$T_i - T_p = -\frac{q'}{4\pi\lambda}\left\{\ln\left(\frac{e^{\gamma}r^2(t_p + \Delta t)}{4\alpha t_p(\Delta t)}\right) - s\right\} \quad (5\text{-}16)$$

T_p = temperatura na kraju TRT-a, neposredno prije gašenja grijača (°C)

Za vrijednosti vremena oporavka temperature i ugašenih grijača koje su dovoljno male u usporedbi s trajanjem početnog perioda konstantnog zagrijavanja tla $(\Delta t >> t_p)$, moguće je aproksimirati izraz Hornerovog vremena kao $\left(\frac{t_p + \Delta t}{\Delta t}\right)$ = 1. Uvrštavanjem vrijednosti T_i =

T_{1h} , vrijednost *skin* faktora iz inovativne metode tasta oporavka temperature na bušotinskim izmjenjivačima, može se izraziti kao :

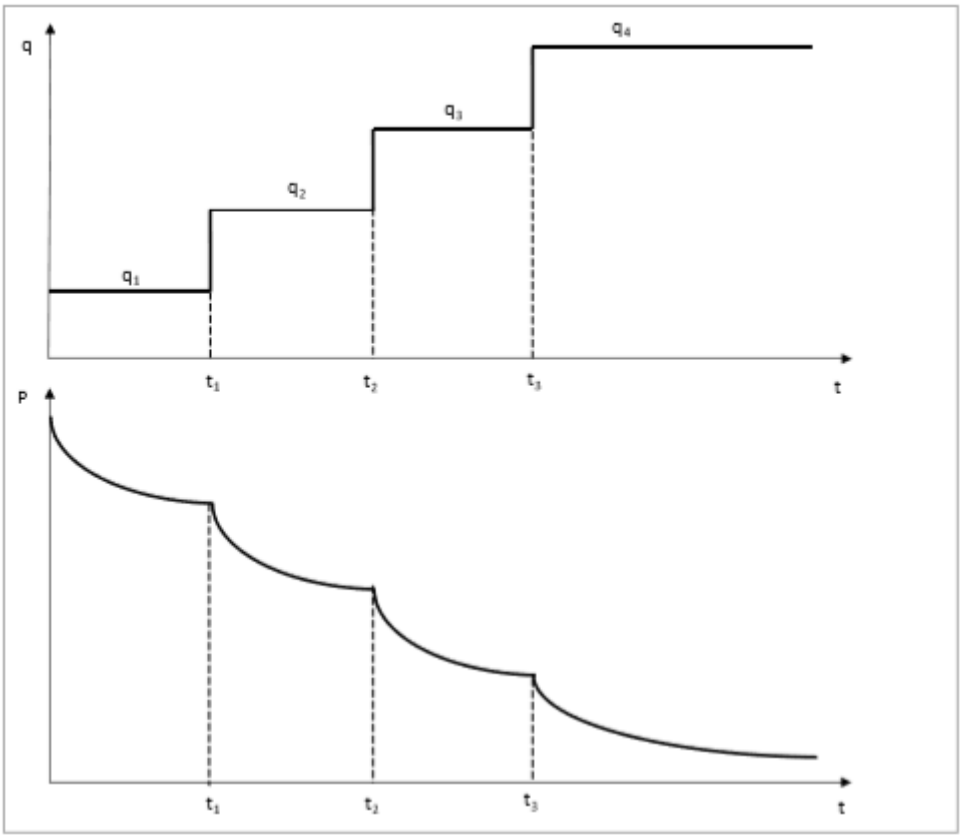
$$s = 1.151\left\{\frac{T_{1h} - T_p}{m} + \log\left(\frac{e^{\gamma} r^2}{4\alpha}\right)\right\}$$
$$s = 1.151\left\{\frac{T_{1h} - T_p}{m} + \log\left(\frac{r^2}{\alpha}\right) - 0.351\right\} \quad (5\text{-}17)$$

Vrijednost T_{1h} je arbitrarno određena zbog jednostavnosti proračuna i najčešće se upotrebljava u naftnom inženjerstvu prilikom analitičkog proračuna *skin* faktora. Proračun je moguće izvesti i s drugim vrijednostima Δt prilikom čega treba obratiti pozornost na promjenu konstante 0.351 u jednadžbi (5-17). Razlog važnosti proračuna *skin* efekta putem Hornerove metode je moguća usporedba i evaluacija s vrijednosti *skin* efekta izračunatom iz klasičnog TRT perioda mjerenja koji je pod utjecajem fluktuacija napona lokalne električne mreže. U teoriji bi izrazi (5-15) i (5-17) trebali dati jednake vrijednosti što je praksi rijetkost upravo zbog podložnosti klasičnih TRT mjerenja vanjskim utjecajima. Vrijednosti dobivene iz inovativne metode testa oporavka temperature i primjene Hornerove metode proračuna daju pouzdanije vrijednosti (Kurevija et al., 2018c).

5.4. Test višestrukih toplinskih uvjeta i metoda određivanja potencijala bušotinskih izmjenjivača topline

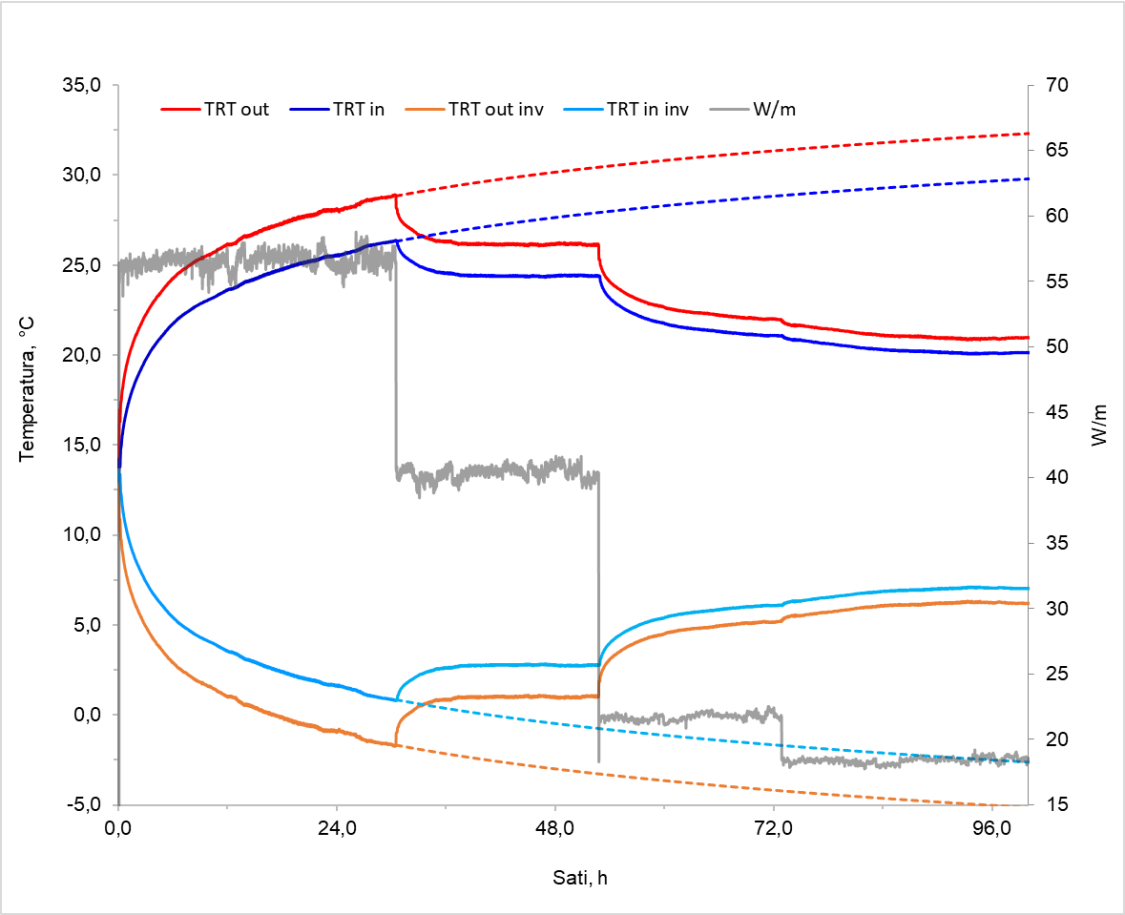
Porast broja ugrađenih plitkih geotermalnih sustava u zadnjem desetljeću rezultat je šire upotrebe koja nije ograničena isključivo na monovalentni režim grijanja. Također, sve je veći broj sustava koji uključuju i režim pasivnog ili aktivnog hlađenja putem plitkih geotermalnih izvora Sve češća je instalacija hibridnih sustava grijanja, pogotovo u slučaju obnove već postojećih objekata s povećanim toplinskim gubicima s ciljem postizanja veće energentske efikasnosti. Ukratko, radi se o objektima kod kojih već postoji priključak na plinsku mrežu u sklopu prijašnjeg režima grijanja. Prilikom instalacije plitkog geotermalnog sustava, plin se može koristit kao sekundarni energent. Izrazito bitna stavka kod ovakvih sustava je modeliranje tzv. bivalentne točke ili bivalentne temperature, odnosno vanjske temperature pri kojoj će se automatski isključiti primarni sustav grijanja (dizalica topline) i uključiti sekundarni sustav (plin). Prilikom iznadprosječno niskih zimskih temperatura

zraka, u starijim zgradama s lošom izolacijom dolazi do povećanih toplinskih gubitaka i potrebna je veća količina toplinske energije da bi se održala optimirana temperatura unutar objekta. Da bi se izbjeglo povećano crpljenje toplinske energije iz tla i opasno dodatno pothlađivanje tla, na uštrb dugoročnosti postavljenog sustava, hibridni sustav prestaje s opskrbom iz bušotinskih izmjenjivača i prelazi na grijanje putem plinskog kotla. Prema normi EN 14511 kojom su određeni uvjeti ispitivanja performanse dizalica topline, standardni testni uvjeti su 0/-3°C. To znači da je preporučeno dimenzionirati plitki geotermalni sustav na način da ulazna temperatura u sustav dizalice temperature, odnosno temperatura koja dolazi iz tla, ne bude ispod ništice. U protivnom, smrzavanje tla može dovesti do oštećenja podzemnih geoloških formacija uslijed širenja zbog stvaranja leda , također nužno je osigurati da ne dođe do smrzavanja radnog fluida u bušotinskim izmjenjivačima uz dodavanje aditiva koji snižavaju ležište, ali i povećavaju viskoznost fluida. To dovodi do povećanog pada tlaka u sustavu i povećane potrošnje energije za rad cirkulacijske pumpe. Metode određivanja toplinskog potencijala bušotinskih izmjenjivača pri optimalnim uvjetima slabo su pokrivene u tehničkoj literaturi. Primjena načela iz hidrodinamičkih mjerenja i u ovom slučaju se pokazala korisna zahvaljujući dugogodišnjoj praktičnoj primjeni (Kurevija i Strpić, 2018a). Test višestrukih protočnih uvjeta (engl. *step test*) u hidrodinamičkim mjerenjima sastoji se od provođenja različitih stopa proizvodnje iz istražne bušotine. Kontinuirano se bilježi pripadni pad tlaka za svaku od proizvodnih stopa. Krajnji rezultat je mogućnost procjene stope proizvodnje za bilo koji pripadni pad tlaka pomoću ekstrapolacije trenda mjerenih podataka te određivanje maksimalne moguće dobavi pri maksimalnoj dopuštenoj depresiji tlaka koju formacija može podnijeti. Tipski prikaz snimljenih podataka za vrijeme step testa u hidrodinamici prikazan je na slici 5-12. Potrebno je postići tri do četiri promjene protoka uz napomenu da prvi protok mora biti barem četiri puta veći od zadnjeg, najmanjeg prinosa fluida. Empirijska metoda interpretacije podataka (Stewart, 2011.) uzima u obzir da se krivulja koja povezuje dobivene točke u log-log mjerilu može aproksimirati ravnom linijom pod uvjetom da je za vrijeme svakog protočnog uvjeta postignuto polu-ustaljeno stanje protoka.



Slika 5-12. Tipski prikaz podataka o tlaku i protoku dobivenih step testom u hidrodinamičkim mjerenjima

Primjena ovakve inovativne metode mjerenja u termogeologiji može pomoći u razumijevanju ponašanja svojstava bušotinskog fluida prilikom uvjeta promjenjive toplinske snage kao što je slučaj s inverterskim tipom dizalice topline. Time je moguće odrediti temperaturu bušotinskog fluida prilikom vršnih perioda potrošnje toplinske energije za vrijeme najhladnijeg zimskog perioda. Tipski prikaz inovativnog seta mjerenja koji odgovara step testu u hidrodinamičkim mjerenjima, prikazan je na slici 5-13. Odabrani naziv za ovakvu metodu je Steady State Thermal Response Test (SSTRT) odnosno test višestrukih toplinskih uvjeta u kojem je ispunjen zahtjev postizanja polu-ustaljenog stanja širenja toplinskog toka u periodu svakog od uvjeta.



Slika 5-13. Podaci dobiveni SSTRT-om uz pripadnu snagu toplinskih grijača za vrijeme svakog od toplinskih uvjeta

Kao što je već spomenuto, analitički je moguće opisati ponašanje tlaka/temperature prilikom promjenjivih uvjeta prinosa fluida/topline pomoću načela superpozicije (Stewart, 2011), (Lee, 1982). Upravo uz pomoć načela superpozicije je moguće analitičkim putem doći do vrijednosti temperature bušotinskog fluida za bilo koju vrijednost snage grijača. Na slici 5-13 trajanje prvog toplinskog uvjeta je prošireno do 96 h uz primjenu rješenja *line source* jednadžbe i prethodnu izračunatu vrijednost toplinske vodljivosti. Iz perioda prvog toplinskog uvjeta moguće je odrediti vrijednost toplinske vodljivosti i toplinskog otpora s obzirom da uz primjenu metode derivacijske krivulje sa sigurnošću znamo da je ispunjen zahtjev za postizanjem polu-ustaljenog stanja širenja toplinskog toka. Za tri toplinska uvjeta, što je minimalan potreban broj prilikom izvođenja step testa, prvi toplinski uvjet je provedem uz najveću toplinsku snagu grijača TRT aparature i analitički se može izraziti kao:

I. Uvjet

$$t_p \le t \le t_1$$

$$\Delta T(t) = T_i + \frac{q_1^{'}}{2\pi\lambda}\Delta t_D(t) + \Delta T_{skin} \tag{5-17}$$

Δt_D = faktor bezdimenzionalnog vremena, korišten radi preglednosti raspisa izraza

$$\Delta t_D = \frac{1}{2} Ei\left(\frac{r^2}{4\alpha t}\right)$$

Nakon toplinskog uvjeta koji završava u periodu t_1, snaga toplinskih grijača se smanjuje sam q_1 na q_2.

II. Uvjet

$$t_1 \le t_2$$

$$\Delta T(t) = T_i + \frac{q_1^{'}}{2\pi\lambda}\Delta t_D(t) + \frac{(q_2^{'} - q_1^{'})}{2\pi\lambda}\Delta t_D(t - t_1) + \Delta T_{skin2} \tag{5-18}$$

Na kraju drugog toplinskog uvjeta slijedi treći toplinski uvjet i smanjenje snage toplinskih grijača na vrijednost q_3.

III. Uvjet

$$t_1 \le t_2 \le t_3$$

$$\Delta T(t) = T_i + \frac{q_1^{'}}{2\pi\lambda}\Delta t_D(t) + \frac{(q_2^{'} - q_1^{'})}{2\pi\lambda}\Delta t_D(t_1) + \frac{(q_3^{'} - q_2^{'})}{2\pi\lambda}\Delta t_D(t_3 - t_2) + \Delta T_{skin3} \tag{5-19}$$

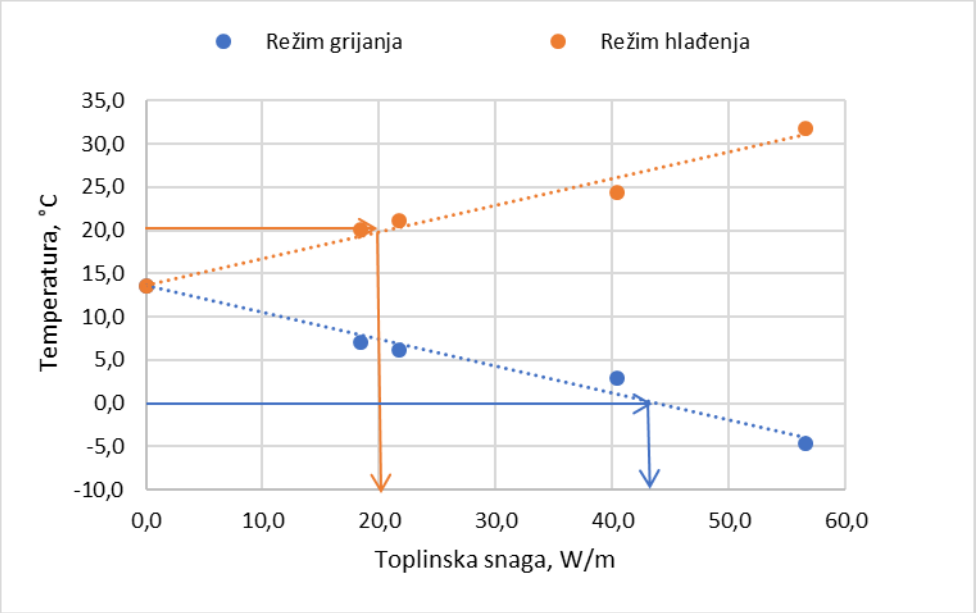
Prema tome, generalni izraz za računanje vrijednosti temperature bušotinskog fluida na kraju provođenja SSTRT-a uz arbitrarno određen broj koraka, *n*, glasi.

$$\Delta T(t) = T_i + \frac{q_1^{'}}{2\pi\lambda}\Delta t_D(t) + \frac{(q_2^{'} - q_1^{'})}{2\pi\lambda}\Delta t_D(t_1) + \ldots + \frac{(q_n^{'} - q_{n-1}^{'})}{2\pi\lambda}\Delta t_D(t_n - t_{n-1}) + \Delta T_{skinn} \tag{5-20}$$

Razlika temperature uzrokovana skin efektom razlikuje se za svaki od perioda i potrebno ju je proračunati za svaki period posebno uz pripadnu snagu toplinskih grijača i prosječnu temperaturu bušotinskog fluida za taj period.

Prikazivanjem odnosa temperature bušotinskog fluida i snage toplinskih grijača za svaki od perioda inovativnog testa sa višestrukim toplinskim uvjetima, moguće je dobiti uvođenjem *trendline* linije među dobivenim točkama dobiti graf nalik grafu prikazanom sna slici 5-14.

Na slici je putem principa inverzije/zrcaljenja, prikazan i set podataka za realan rad toplinske dizalice u režimu grijanja, dok se podaci dobiveni uz zagrijavanjem tla TRT aparaturom mogu poistovjetiti s pohranom toplinske snage u tlo za vrijeme režima hlađenja.



Slika 5-14. Potencijal pridobivanja i pohrane toplinske snage u tlo uz ustaljeno stanje širenja toplinskog toka u funkciji temperature bušotinskog fluida

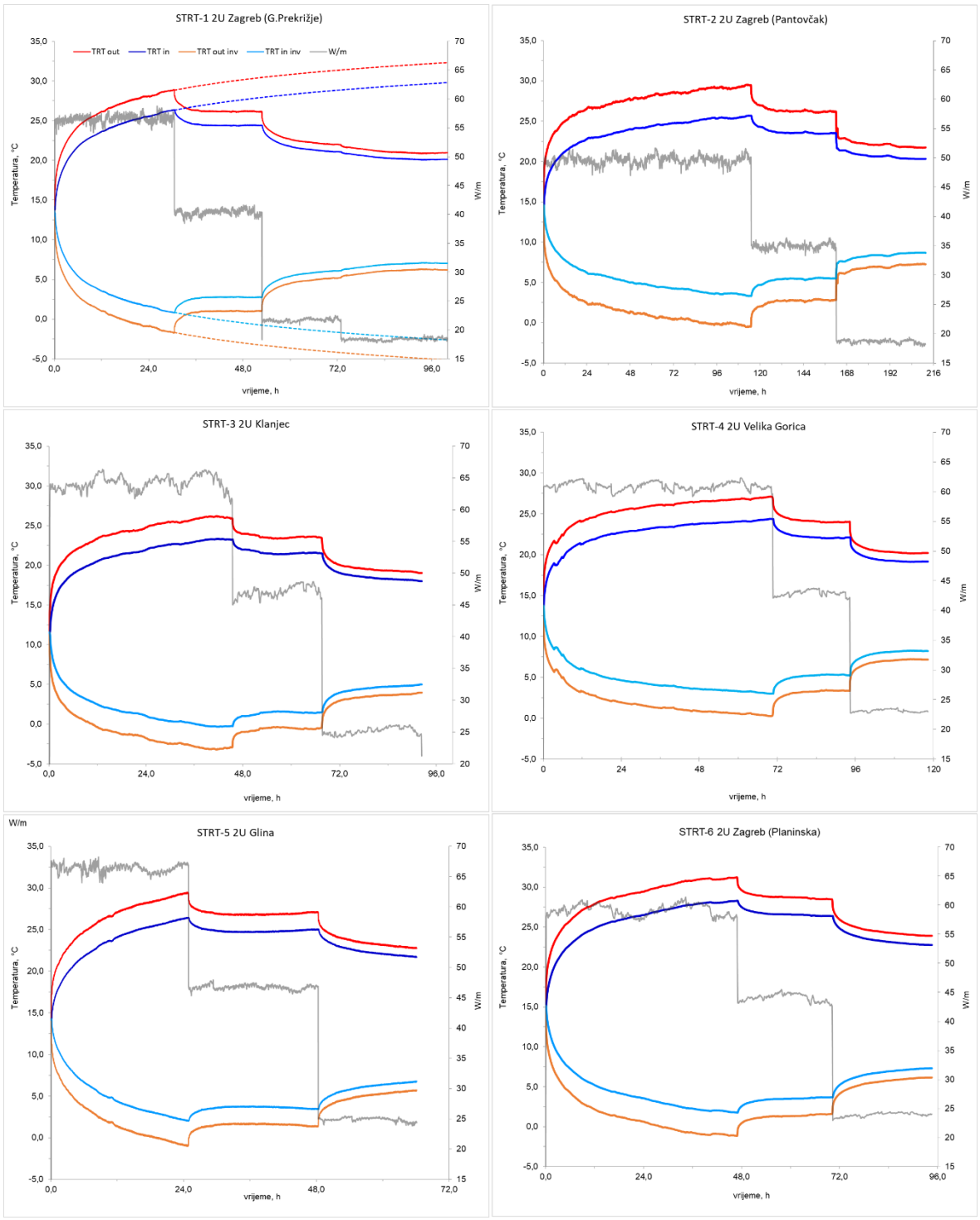
Iz priloženog tipskog prikaza rezultat SSTRT-a moguće je procijeniti količinu toplinske energije iz izmjenjivača topline postavljenih na određenoj lokaciji za režim hlađenja i grijanja uz uvjet opterećenja tla koji je u skladu s ciljem dugoročnog i efikasno dimenzioniranog sustava. U slučaju procjene potencijala prema normi EN 14511, prema kojoj se ispituju performanse dizalice pri temperaturi bušotinskog fluida 0°C za režim grijanja, iz grafa sa slike 5-14. moguće je očitati da je prinos toplinske snage u tim uvjetima 43 W po metru bušotinskog izmjenjivača. Za slučaj režima hlađenja i optimalne temperature prinosa 20°C nakon pohrane vanjske topline u tlo, kapacitet za pasivno hlađenje iznosi 20 W po metru bušotinskog izmjenjivača. S obzirom da u pasivnom režimu hlađenja, ulaznom fluidu za vrijeme prolaska kroz pločasti izmjenjivač dizalice topline, raste temperatura u prosjeku za dodatnih 1,5 °C, takav prinos je nedostatan za standardne objekte. To je dobar pokazatelj da za navedenu lokaciju, za slučaj korištenja toplinske dizalice i za režim hlađenja, treba razmotriti opciju aktivnog sustava hlađenja .

6. SSTRT MJERENJA NA PODRUČJU REPUBLIKE HRVATSKE

U sklopu diplomskog rada obavljeno je devet SSTRT mjerenja na bušotinskim izmjenjivačima topline koji su postavljeni u proteklih godinu dana na različitim lokacijama, u suradnji s mentorom. Na šest od devet navedenih sustava postavljeni su 2U izmjenjivači topline, dok je na ostala tri sustava postavljen koaksijalni sustav izmjenjivača. Na svakoj od lokacija određena je vrijednost toplinske vodljivosti tla iz početnog klasičnog TRT-a koji je ujedno prvi korak SSTRT-a.

6.1. Analiza lokacija s ugrađenim 2U izmjenjivačima topline

Na slici 6-1. prikazani su podaci snimljeni za vrijeme mjerenja na lokacijama s 2U tipom izmjenjivača topline. Prvi uvjet moguće je, uz izračunatu vrijednost toplinske vodljivosti prema postupku opisanom u poglavlju 5.2. i izračunat toplinski otpor, pomoću formule za rješenje *line source* teorije bušotinskih izmjenjivača kao linijskog izvora topline (4-4). Time je moguće u sklopu SSTRT mjerenja imati prolongirane podatke klasičnog TRT pri konstantnoj toplinskoj snazi i time zamijeniti skupa dugotrajna konvencionalna mjerenja ovom metodom.



Slika 6-1. SSTRT mjerenja na lokacijama s instaliranim 2U izmjenjivačima topline

Na svim lokacijama izvršeno je mjerenje s dva do tri različita toplinska uvjeta uz zadan odnos tako da je prvi uvjet, najveće snage, barem dva do tri puta veći posljednjeg, najmanjeg uvjeta. Dodatni uvjeti odnosa toplinske snage u funkciji temperature bušotinskog izmjenjivača koji su uzeti u analizi su početni uvjeti cirkulacije s ugašenim grijačima pri

kojima se mjeri statička temperatura te izračunati prolongirani prvi toplinski uvjet nakon 200 h mjerenja.

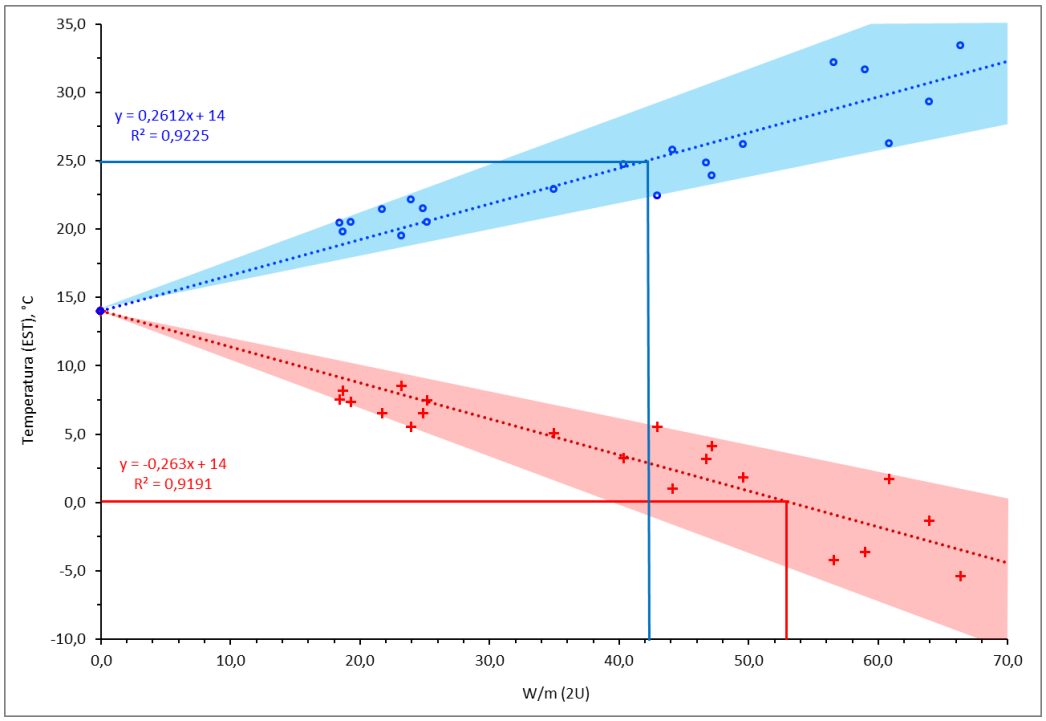
U tablici 6-1. svaka lokacija iz navedenih šest mjerenja je opisana uz podatke o snazi toplinskih grijača za svaki od toplinskih uvjeta, postignutu temperaturu na kraju perioda uz postizanje polu-ustaljenog stanja širenja toplinskog toka te podatke o toplinskoj vodljivosti izračunate iz prvog toplinskog uvjeta koji je najduži i najveće snage.

Tablica 6-1, Tehnički podaci i termogeološka svojstva na analiziranim lokacijama

Zagreb , Gornje Prekrižje				
Toplinska vodljivost	1,54 W/ (m K)			
SSTRT	Trajanje	EST(gr)°C	EST(hl)°C	W/m
I. Prolongirani uvjet	200 h	-4,6	31,8	56,6
I. Uvjet	20 h	2,9	24,3	40,4
II. Uvjet	23 h	6,1	21,1	21,7
III. Uvjet	27 h	7,1	20,1	18,4
Početni uvjet	/	13,6	13,6	0
Zagreb, Pantovčak				
Toplinska vodljivost	2,07 W/(m K)			
SSTRT	Trajanje	EST(gr)°C	EST(hl)°C	W/m
I. Prolongirani uvjet	200 h	2,3	26,7	49,6
I. Uvjet	45 h	5,6	23,4	35,0
II. Uvjet	40 h	8,7	20,3	18,7
Početni uvjet	/	14,5	14,5	0
Klanjec, zgrada muzeja				
Toplinska vodljivost	2,25 W/ (m K)			
SSTRT	Trajanje	EST(gr)°C	EST(hl)°C	W/m

I.	Prolongirani uvjet	200 h	-3,8	26,8	64,0
I.	Uvjet	22 h	1,6	21,4	47,1
II.	Uvjet	28 h	5,0	18,0	25,2
Početni uvjet		/	11,5	11,5	0
Velika Gorica, Fagus prodajni centar					
Toplinska vodljivost		3,16 W/ (m K)			
SSTRT		Trajanje	EST(gr)°C	EST(hl)°C	W/m
I.	Prolongirani uvjet	200 h	1,4	26,0	64,0
I.	Uvjet	24 h	5,2	22,2	47,1
II.	Uvjet	24 h	8,2	19,2	25,2
Početni uvjet		/	13,7	13,7	0
Glina- Dječji vrtić Rakovac					
Toplinska vodljivost		1,47 W/ (m K)			
SSTRT		Trajanje	EST(gr)°C	EST(hl)°C	W/m
I.	Prolongirani uvjet	200 h	-5,2	33,6	66,3
I.	Uvjet	24 h	3,4	25,0	46,7
II.	Uvjet	20	6,7	21,7	24,9
Početni uvjet		/	14,2	14,2	0
Zagreb , Planinska					
Toplinska vodljivost		1,78 W/ (m K)			
SSTRT		Trajanje	EST(gr)°C	EST(hl)°C	W/m
I.	Prolongirani uvjet	200 h	-3,0	32,3	59,0
I.	Uvjet	22 h	1,6	26,4	44,1
II.	Uvjet	26 h	6,2	22,8	24,9
III.	Uvjet	24 h	8,0	21,1	19,3
Početni uvjet		/	14,6	14,6	0

Razlike u početnim, statičkim temperaturama rezultat su geološke posebnosti svake od analiziranih lokacija, vrijednosti geotermalnog gradijenta na lokaciji te dubini bušotine. S ciljem povećanja pojednostavljenja procjene toplinskog kapaciteta putem metode opisane u poglavlju 5.4. i dobivanja srednje vrijednosti grafo-analitičkim putem, odabrana je vrijednost statičke temperature koja je uniformna za sve lokacije i iznosi 14°C. Iznos odstupanja stvarne statičke temperature od proizvoljno odabrane uniformne vrijednosti dodana je , odnosno oduzeta, od temperatura bušotinskog fluida koje su izmjerene prilikom svakog od toplinskih uvjeta provedenih SSTRT-ova. Temperatura bušotinskog fluida u funkciji pohrane toplinske snage, i zrcaljenjem podataka prikazanog pridobivanja toplinske snage u režimu grijanja objekta, interpretirana je na dijagramu sa slike 6-2. Snopom boje obuhvaćen je spektar varijacija temperature bušotinskog fluida u odnosu na pripadni toplinski kapacitet.



Slika 6-2. Izmjerene vrijednosti temperature bušotinskog fluida 2U izmjenjivača u funkciji toplinske snage prilikom pridobivanja i pohrane topline u tlo na analiziranim lokacijama

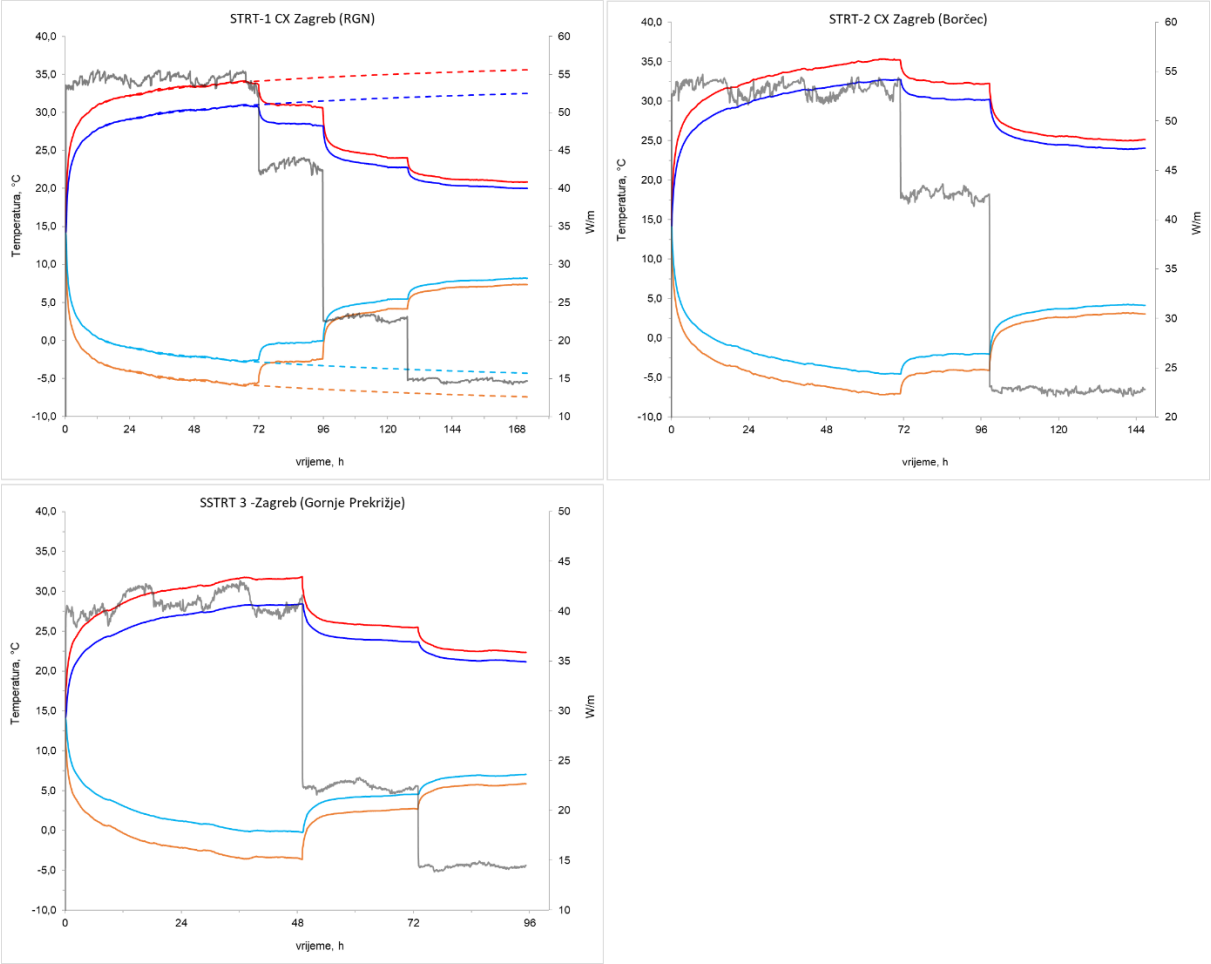
Primjena inovativne metode SSTRT mjerenja na različitim lokacijama omogućila je novi pristup podacima dobivenima mjerenjem na toplinskim izmjenjivačima topline. Dokazuje da svrha TRT-a ne mora nužno biti ograničena na pridobivanje podataka o toplinskim

svojstvima tla i toplinskom otporu bušotinskog izmjenjivača, već je pomoću modifikacije testa moguće odrediti toplinski kapacitet pohrane i pridobivanja toplinske energije iz tla. Ovakav podatak je od iznimne koristi inženjerima prilikom projektiranja budućih sustava. Kvalitetna baza podataka za različite lokalitet na području Republike Hrvatske, o karakterističnom toplinskom prinosu plitkog geotermalnog grijanja, može poslužiti kao osnova procjeni novoinstaliranih sustava, i kvaliteti projektiranja s obzirom na ostale sustave u okolici. Iz navedenih podataka za lokacije na kojima su postavljeni 2U izmjenjivači topline i na kojima je proveden SSTRT u sklopu istraživanja, moguće je očitati da prosječan pridobivi toplinski prinos u režimu grijanja, uz uvjet da temperatura bušotinskog fluida ne pada ispod 0°C , iznosi prosječno 53,2 W po metru postavljenog bušotinskog izmjenjivača. Pohrana toplinske energije za vrijeme režima hlađenja objekta kojeg snabdjela plitki geotermalni sustav, procijenjena je s obzirom na uzlazni tok bušotinskog fluida koji dolazi do dizalice topline uz provođenje aktivnog hlađenja, pa je razmotrena nešto viša temperatura nego u slučajevima pasivnog hlađenja. Za EST 25°C u režimu aktivnog hlađenja, mogući prinosi za navede lokacije su prosječno 43,1 W po metru postavljenog izmjenjivača.

6.2. Analiza lokacija s ugrađenim koaksijalnim izmjenjivačima topline

Od ukupno prikupljenih podataka o lokacijama na kojima se koristi plitki geotermalni potencijal na području Republike Hrvatske, prikupljeni su podaci pet lokacije na kojima su instalirani koaksijalni bušotinski izmjenjivači topline. Tijekom analize koja je provedena sa svrhom izrade diplomskog rada, od navedenih lokacija SSTRT mjerenja su izvedena na dvije privatne lokacije s postavljenim koaksijalnim izmjenjivačima na području Zagreba. Treća dostupna lokacija na kojoj je izvršeno mjerenje su testni koaksijalni bušotinski izmjenjivači topline na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu u Zagrebu. Testni izmjenjivači služe za potrebe praktičnog dijela vježbi iz kolegija Primijenjena termogeologija i ne sudjeluju u procesu zagrijavanja zgrade fakulteta te iz tog razloga nisu označeni na karti lokacija aktivnih plitkih geotermalnih sustava u RH. Pogodnost odabira ovih testnih izmjenjivača je u dostupnosti za izvođenje mjerenja u obrazovne i znanstvene svrhe koje omogućava fakultet. Osim toga na navedenom sustavu su obavljena broja mjerenja koja su objavljena i dostupna u znanstvenim časopisima poput *Rudarsko-geološko-naftnog zbornika, Energies* i *Renewable Energies*. Dostupna podloga već izmjerenih podataka omogućuje provjeru valjanosti provedenih novih mjerenja s obzirom na uvid o odstupanju dobivenih vrijednosti

i čimbenika koji su mogli utjecati na odstupanje. Na slici 6-3. prikazani su rezultati provedenog SSTRT-a na tri lokacije s koaksijalnim izmjenjivačima.



Slika 6-3. SSTRT mjerenja na lokacijama s postavljenim koaksijalnim izmjenjivačima topline

Na lokacijama je izvršeno mjerenje s dva do tri različita toplinska uvjeta uz zadan odnos tako da je prvi uvjet, najveće snage, barem dva do tri puta veći posljednjeg, najmanjeg uvjeta. Dodatni uvjeti odnosa toplinske snage u funkciji temperature bušotinskog izmjenjivača koji su uzeti u analizi su početni uvjeti cirkulacije s ugašenim grijačima pri kojima se mjeri statička temperatura te izračunati prolongirani prvi toplinski uvjet nakon 200 h mjerenja.

U tablici 6-2. su navedeni podaci o snazi toplinskih grijača za svaki od toplinskih uvjeta, postignutu temperaturu na kraju perioda uz postizanje polu-ustaljenog stanja širenja toplinskog toka te podaci o toplinskoj vodljivosti izračunate iz prvog toplinskog uvjeta koji je najduži i najveće snage.

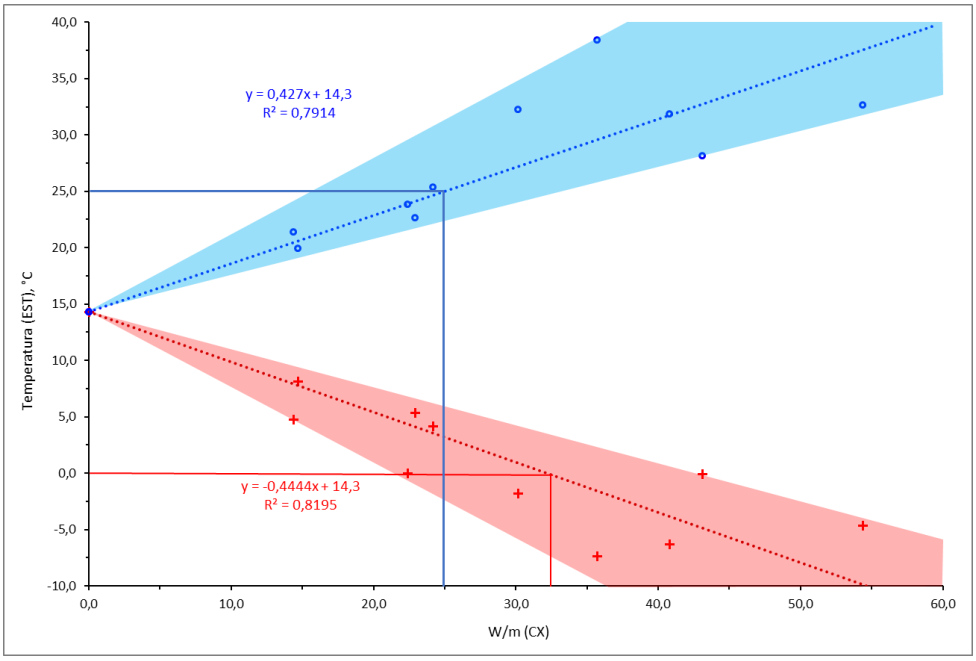
Tablica 6-2. Tehnički podaci i termogeološka svojstva na analiziranim lokacijama

Zagreb , RGN				
Toplinska vodljivost	2,55 W/ (m K)			
SSTRT	Trajanje	EST(gr)°C	EST(hl)°C	W/m
I. Prolongirani uvjet	200 h	-4,6	32,8	54,0
I. Uvjet	24 h	0,0	28,2	43,1
II. Uvjet	32 h	5,5	22,7	23,0
III. Uvjet	44 h	8,2	20,0	14,7
Početni uvjet	/	14,4	14,4	0

Zagreb , Gornje Prekrižje				
Toplinska vodljivost	1,50 W/ m K			
SSTRT	Trajanje	EST(gr)°C	EST(hl)°C	W/m
I. Prolongirani uvjet	200 h	-6,5	31,7	40,8
I. Uvjet	24 h	-0,2	23,7	22,4
II. Uvjet	24 h	4,5	21,2	14,4
Početni uvjet	/	14,1	14,1	0

Zagreb , Borčec				
Toplinska vodljivost	1,54 W/ m K			
SSTRT	Trajanje	EST(gr)°C	EST(hl)°C	W/m
I. Prolongirani uvjet	200 h	-7,5	38,3	35,7
I. Uvjet	28 h	-1,9	32,2	30,1
II. Uvjet	48 h	4,0	25,2	24,2
Početni uvjet	/	14,2	14,2	0

Razlike u početnim, statičkim temperaturama rezultat su geološke posebnosti svake od analiziranih lokacija, vrijednosti geotermalnog gradijenta na lokaciji te dubine postavljenih koaksijalnih sustava. S ciljem pojednostavljenja procjene toplinskog kapaciteta putem metode opisane u poglavlju 5.4. i dobivanja srednje vrijednosti grafo-analitičkim putem, odabrana je vrijednost statičke temperature koja je uniformna za sve lokacije i iznosi 14,3°C. Iznos odstupanja stvarne statičke temperature od proizvoljno odabrane uniformne vrijednosti dodana je, odnosno oduzeta, od temperatura bušotinskog fluida koje su izmjerene prilikom svakog od toplinskih uvjeta provedenih SSTRT-ova. Značajna razlika u toplinskoj vodljivosti tla izmjerenoj na lokaciji RGN fakulteta rezultat je smještaja značajne duljine bušotinskih izmjenjivača topline u vodonosnom sloju. U tom slučaju uz uobičajeni konduktivni prijenos topline postoji i advektivni prijenos topline. Temperatura bušotinskog fluida u funkciji pohrane toplinske snage, i zrcaljenjem podataka prikazanog pridobivanja toplinske snage u režimu grijanja objekta, interpretirana je na dijagramu sa slike 6-4. Snopom boje obuhvaćen je spektar varijacija temperature bušotinskog fluida u odnosu na pripadni toplinski kapacitet.



Slika 6-4. Izmjerene vrijednosti temperature bušotinskog fluida CX izmjenjivača u funkciji toplinske snage prilikom pridobivanja i pohrane topline u tlo na analiziranim lokacijama

Iz navedenih podataka za lokacije na kojima su postavljeni 2U izmjenjivači topline i na kojima je proveden SSTRT u sklopu istraživanja, moguće je očitati da prosječan pridobivi toplinski prinos u režimu grijanja, uz uvjet da temperatura bušotinskog fluida ne pada ispod

0°C , iznosi prosječno 32,2 W po metru postavljenog bušotinskog izmjenjivača. Ukoliko je vršna potrošnja objekta u najhladnijem zimskom periodu veća od 32,2 W/m potrebno je vodi koja je u funkciji cirkulirajućeg bušotinskog fluida dodati sredstvo koje snižava ledište vode, tzv. antifrizno sredstvo. Najčešće je to etilen-glikol ili polietilen-glikol. Pohrana toplinske energije za vrijeme režima hlađenja objekta kojeg snabdjela plitki geotermalni sustav, procijenjena je s obzirom na uzlazni tok bušotinskog fluida koji dolazi do dizalice topline uz provođenje aktivnog hlađenja, pa je razmotrena nešto viša temperatura nego u slučajevima pasivnog hlađenja. Za EST 25°C u režimu aktivnog hlađenja, mogući prinosi za navede lokacije su prosječno 24,9 W po metru postavljenog izmjenjivača.

7. PRIKUPLJENI PODACI O PLITKIM GEOTERMALNIM SUSTAVIM U HRVATSKOJ

Trend porasta broja instaliranih plitkih geotermalnih sustava u Hrvatskoj nešto je sporiji nego u ostatku Europe. Pravu procjenu količine energije koja se dobiva iz takvih izvora teško je procijeniti s obzirom da u Republici Hrvatskoj ne postoji odgovorno državno tijelo koje vodi evidenciju o broju ugrađenih sustava. Iznimka su *otvoreni sustavi* izmjenjivača topline za koje je potrebna dozvola Hrvatskih voda, a kasnije i nadzor hidrogeologa prilikom puštanja postavljenih zdenaca u rad. Dubinski i plitki izmjenjivači topline *zatvorenih sustava* u Hrvatskoj se vode kao jednostavni građevinski objekti prema *Pravilniku o jednostavnim i drugim građevinama i radovima* iz 2018. godine izdanom od strane Ministarstva graditeljstva i prostornog uređenja. Člankom 3) i člankom 5) definirano da se radovi povezani s instalacijom plitkih geotermalnih sustava mogu izvoditi bez građevinske dozvole i to kako glasi:

Članak 3. Stavka 11b. „ Bez građevinske dozvole i glavnog projekta, mogu se izvoditi radovi:

-Na postojećoj zgradi koja nema više od tri stana, odnosno tri funkcionalne jedinice ili građevinsku (bruto) površinu koja nije veća od 600 m2 a kojima se postojeći sustav grijanja i zagrijavanja potrošne tople vode zamjenjuje sustavom koji je riješen iskorištavanjem toplinske energije tla primjenom dizalica topline čiji podzemni izmjenjivači topline ne prelaze na susjedne čestice.“

Članak 5. stavka 10b. „Bez građevinske dozvole, a u skladu s glavnim projektom mogu se izvoditi radovi:

- Na postojećoj zgradi, ako ovim Pravilnikom nije propisano drukčije, a kojima se postojeći sustav grijanja i zagrijavanja potrošne tople vode zamjenjuje sustavom koji je riješen iskorištavanjem toplinske energije tla primjenom dizalica topline čiji podzemni izmjenjivači topline ne prelaze na susjedne čestice.“

U suradnji s tvrtkama koje se bave projektiranjem i instaliranjem *zatvorenih sustava* bušotinskih izmjenjivača (Ro-Termo i Termogea d.o.o.) u Republici Hrvatskoj te dostupnim podacima iz objavljenih podataka u znanstvenim člancima poput članaka proizašlih iz projekta „Research and the Promotion of the Use of Shallow Geothermal Potential in Croatia“ s evidencijom o 8 postavljenih testnih bušotina koje trenutno sudjeluju u sustavima grijanja diljem Hrvatske. Prikupljeni podaci o približnim lokacija, tipu sustava i količini te

dubini postavljenih izmjenjivača uneseni su u *Google Earth Pro* bazu. Kako bi se izbjeglo eksponiranje vlasnika sustava s obzirom da je cilj popisa lokacija procjena instaliranog kapaciteta sustava i korisna podloga inženjerima prilikom budućih instalacija, lokacije su približno određene u slučaju privatnih posjeda. Prije pregleda označenih lokacija korisno je razmotriti geološke i termogeološke karakteristike tla na području Republike Hrvatske, s obzirom da o njima ovisi i efikasnost samih sustava i troškovi izrade.

7.1. Geološke i termogeološke karakteristike tla u Republici Hrvatskoj

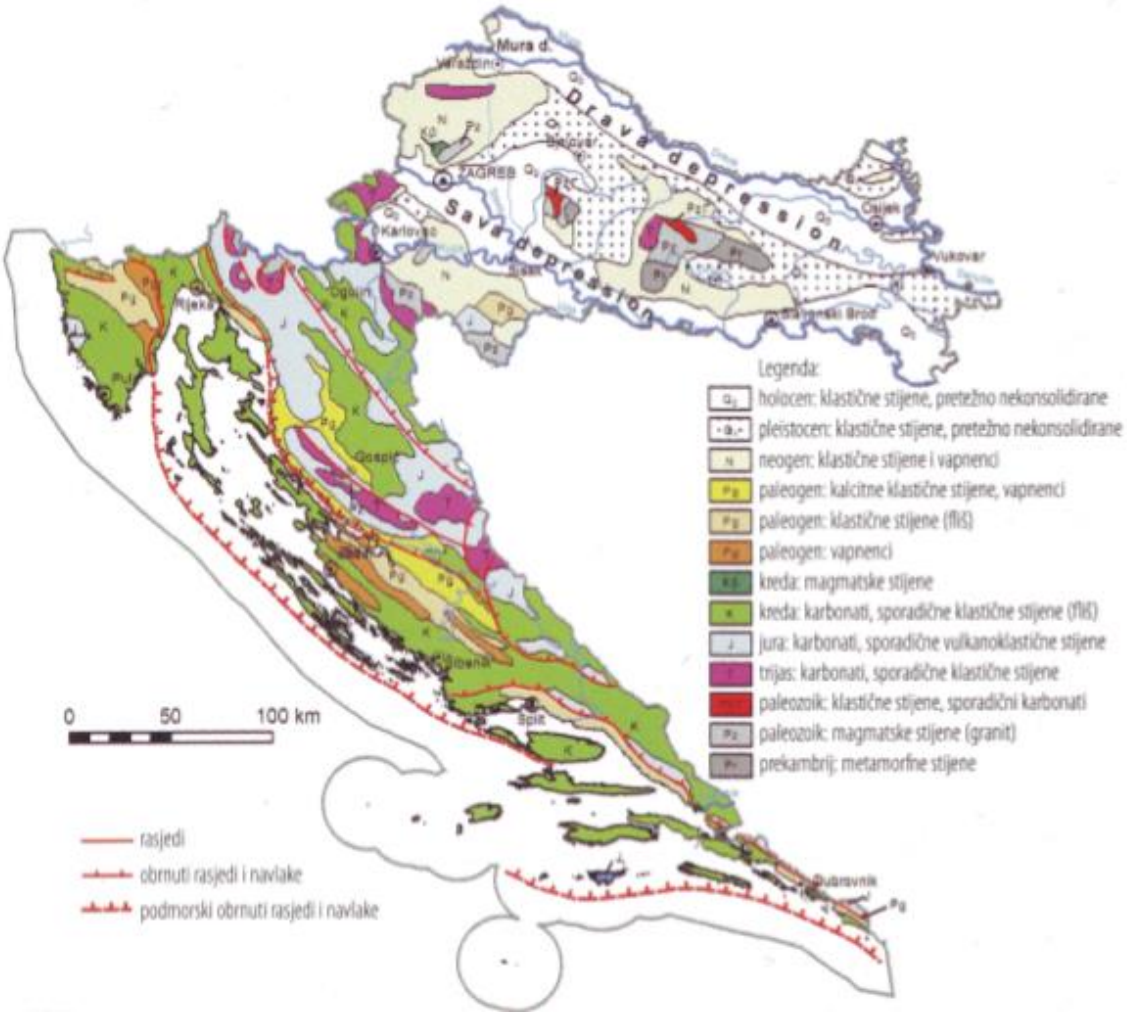
Teritorij RH izgrađen je od pretežno sedimentnih stijena koje pokrivaju više od 95% površine, a koji se mogu podijeliti u dvije skupine (Jelić i Kevrić, 1997):

a) klastiti – nekonsolidirani (šljunci, pijesci, mulj i silt), djelomično konsolidirani (gline) i konsolidirani (pješčenjak, siltit, šejl, breča, lapor, konglomerat),

b) karbonati – vapnenci i dolomiti

Ostatak čine magmatske stijene (1%) i metamorfne stijene (2-4%) površine.

Opća geološka karta Hrvatske na slici 7-1. pokazuje raspodjelu vrste stijena i pripadna geološka razdoblja.



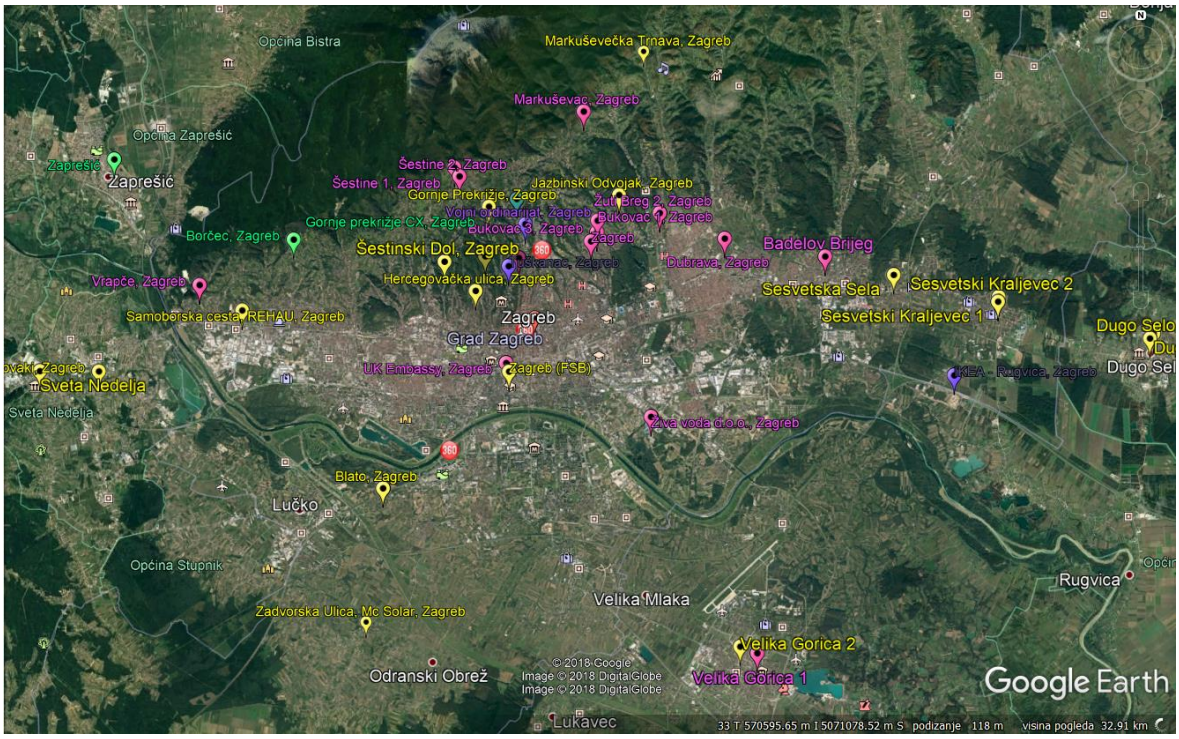
Slika 7-1. Opća geološka karta Republike Hrvatske (Antić et al., 1993)

U Panonskom bazenu dominiraju stijene prekambrija, paleozoika te posebno stijene neogena i kvartara (klastiti, metamorfne i magamtske stijene) dok u krškom području južne Hrvatske prevladavaju karbonatne stijene Mezozoika i Paleogena. Na općoj geološkoj karti vidljiva su dva specifična litološka područja. U sjevernom dijelu RH (sjevernije od Karlovca) prevladavaju klastične sedimentne stijene. Termin klastičan odnosi se na stijene ili sedimente sastavljene uglavnom od zdrobljenih fragmenata starih, već postojećih, stijena ili minerala koji su bili preneseni na stanovitu udaljenost od mjesta njihova postanka. Termin se primjenjuje da bi uputio na postanak stijena ili sedimenata iz izvora koji se nalazio unutar i izvan bazena, a šire rasprostranjeni klastiti u Panonskom bazenu su pješčenjak i šejl (Kurevija, 2010). Većina nekonsolidiranih klastičnih stijena su holocenskog i pleistocenskog porijekla, a nalaze se većinom uz područja slivova Save i Drave, te gotovo cijeloj istočnoj Slavoniji. U sjeverozapadnoj Hrvatskoj, na dijelu Banije i zapadnom dijelu Slavonije učestala je pojava neogenskih klastita i vapnenaca. Metamorfne stijene prekambrijske ere najstarije su stijene u Hrvatskoj, s izdancima planine Papuka, Psunja i u dijelu područja

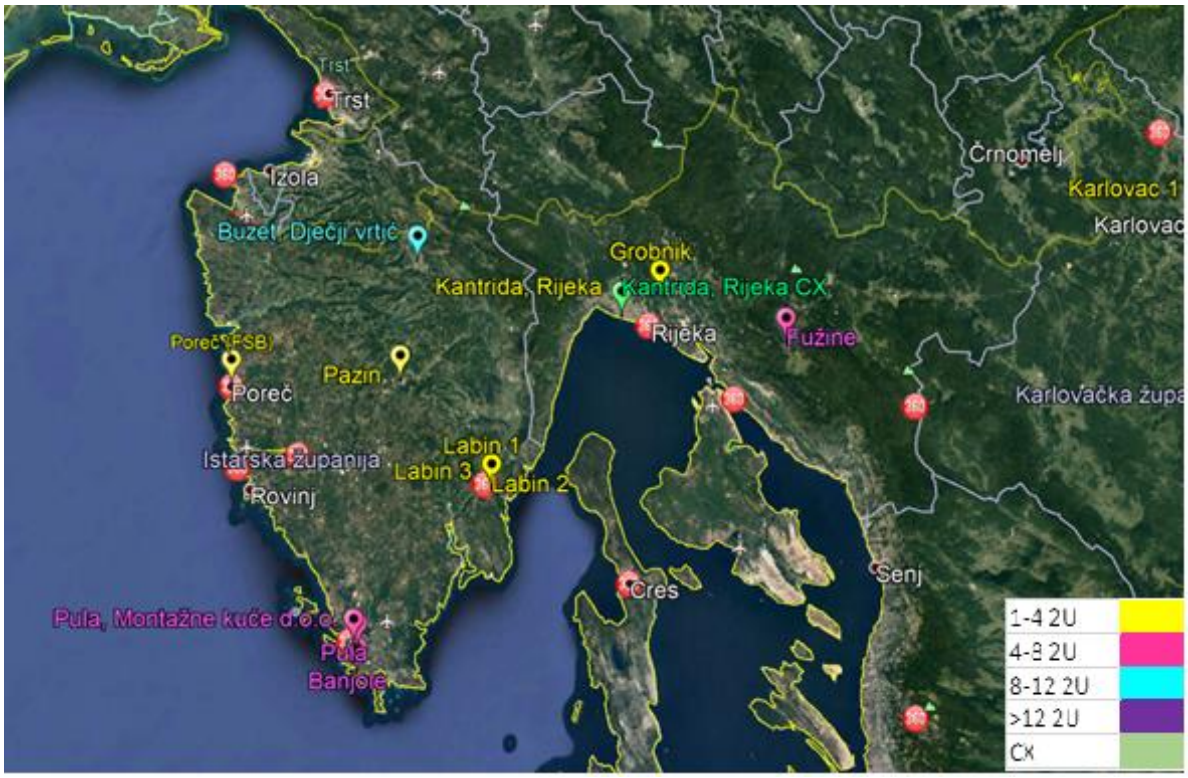
Moslavine, a na istim lokalitetima moguće je pronaći i granite paleozoika. Južnije od Karlovca litologija se mijenja te su stijene uglavnom sastavljene od karbonatnih sedimentnih stijena. Priobalje i otoci su uglavnom građeni od krednih karbonata sa sporadičnom pojavom klastita (fliša) izuzev Zadarskog (paleogenski vapnenci) i Splitskog arhipelaga (paleogenski klastiti, fliš). U području Like i Gorskog Kotara prevladavaju karbonatne stijene trijasa, jure i krede (Kurevija, 2010),

7.2. Prikupljeni podaci o *zatvorenim* sustavima bušotinskih izmjenjivača topline

Potpuna karta s unesenim lokacijama dostupna je na linku : https://www.researchgate.net/publication/327509631_Mapiranje_lokacija_busotinskih_izmjenjivaca_topline_u_Republici_Hrvatskoj_za_period_2005-2018_Google_Earth_kmz_datoteka_Mapping_of_borehole_heat_exchanger_systems_in_the_Republic_of_Croatia_for_the_pe. Kao što je već spomenuto, svi objekti privatne namjene su tek približno označeni na krati s obzirom da je u prikupljenim podacima bio naveden sam grad ili u slučaju Zagrebačke županije, gradska četvrt. Kartirane lokacije obuhvaćaju većinom 2U tipove izmjenjivača topline, nekolicinu lokacija s koaksijalnim izmjenjivačima topline te jednu lokaciju s postavljenim energetskim pilotima (Designer Outlet, Rugvica Zagreb) koji se mogu s obzirom na konstrukciju u razmatranju prinosa i cirkulacije mogu razmatrati kao plitki 2U izmjenjivači. Na slikama 7-2. i 7-3. prikazano je nekoliko isječaka s potpune karte s navedenim lokacijama koji obuhvaćaju žarišne točke s obzirom na broj postavljenih sustava. Uz sliku 7-3. prikazana je i legenda boje oznaka koje pomažu u lakšem raspoznavanju broja ugrađenih jedinica i vrste postavljenih izmjenjivača topline. Legenda oznaka vrijedi za oznake postavljene na svim lokacijama na području RH koje su označene na karti pod prethodno dodanim linkom.



Slika 7-2. Plitki geotermalni sustavi na širem zagrebačkom području



Slika 7-3. Plitki geotermalni sustavi postavljeni na području Istre

Najveći broj ugrađenih plitkih geotermalnih sustava nalazi se na širem zagrebačkom području. Tlo na područje Grada Zagreba i Zagrebačke županije ima izrazito povoljna

hidrogeološka i termogeološka svojstva. Na tom području nalaze se Zagrebački i Samoborsko – Zaprešićki vodonosnici koji su prema vrsti otvoreni vodnosnici i u konstantnom su kontaktu s rijekom Savom. Gornji slojevi tla na ovom području sastoje od tankih slojeva gline koji mjestimično i izostaju. Debljina Zagrebačkog vodnosnika varira između 5 metara na zapadnom dijelu do čak 60 metara na istočnom i 100 metara na jugoistočnom dijelu. Smjer toka vodnosnika u smjeru zapada – istok i zapad – jugoistok slijedeći smjer rijeke Save. Hidraulička vodljivost ima najveće vrijednosti na istočnom dijelu vodnosnika gdje doseže 3000 m/dan dok prema zapada vrijednost opada i iznosi oko 1000 m/dan.

Drugo veće žarište broja postavljenih geotermalnih sustava je područje Istarske županije. Područje Istre pripadan Jadranskoj karbonatnoj platformi. Posebnost na ovom području, s obzirom na ostatak Jadrana su nalazišta mineraloških sirovina, ugljena, na području Labina. Starije naslage na istarskom području sačinjene su od vapnenca i dolomita čija toplinska vodljivost varira u velikom spektru. Gornji slojevi su raznoliki i osim karbonata tu su zastupljena i flišna područja, takozvana Siva Istra, te područja prekrivena zemljom crvenicom, takozvana Crvena Istra. Isključivo geologija nije razlog ugradnje većeg broja sustava na ovom području. Jedan od razloga je umjerena klima. Zime bez učestalih i dugotrajnih minusa kao i relativno blaga ljeta pogodni su uvjeti za bolju efikasnost dizalice topline pri režimu grijanja i hlađenja. Drugi razlog je djelovanje Istarske Regionalne Energetske Agencija (IRENA) koja je sudjelovala u brojnim projektima pridobivanja fondova Europske Unije u sklopu kojih su energetski obnovljeni objekti poput dječjih vrtića i bolnica na području Istre uz prelazak na geotermalno grijanje.

8. DISKUSIJA DOBIVENIH REZULTATA

Za prikupljene podatke o lokacijama s instaliranim plitkim geotermalnim sustavima na području Republike Hrvatske potrebno je napomenuti da se ne radi o kompletnom broju lokacija, već lokacijama koje su tvrtke koje se bave instalacijom navedenih sustava bile spremne podijeliti. Moguće je već iz prvih naznaka procijeniti kako se radi o znatno većem instaliranom kapacitetu toplinske snage nego što je navedeno u izvještaju Energija u Hrvatskoj 2015, posljednjem objavljenom broju godišnjeg pregleda potrošnje i proizvodnje energije u RH kojeg izdaje Ministarstvo zaštite okoliša i energetike, gdje procijenjena instalirana toplinska snaga iz geotermalnih izvora iznosi između 52,79 MW i 129 MW. Ukupna duljina instaliranih bušotinskih izmjenjivača prema prikupljenim podacima za RH iznosi 44 615 m. Od toga, četiri sustava na kojima su ugrađeni koaksijalni izmjenjivači topline čine ukupnu duljinu 3 280 m, dok je ukupna duljina postavljenih 2U bušotinskih izmjenjivača 41 335 m. Uz podatke o dobivenim prinosima za svaku od konfiguracija bušotinskih izmjenjivača, dobivene grafo-analitičkom metodom u poglavlju 6.2. za vrijeme režima grijanja i hlađenja, moguće je procijeniti ukupnu instaliranu toplinsku snagu plitkih geotermalnih sustava u RH kako slijedi u tablicama 8-1. i 8-2. Uzmemo li u obzir prosječni COP dizalica topline koji za režim grijanja iznosi 4.5, dok za režim hlađenja i pohrane topline u tlo iznosi 5,5 (arbitrarno određene vrijednosti) moguće je dobivenu ukupnu instaliranu toplinsku snagu podijeliti na dio koji dolazi iz geotermalnog potencijala i električnu energiju potrebnu za rad kompresora dizalice topline.

Tablica 8-1. Proračun instalirane toplinske snage i pridobive energije iz geotermalnih izvora u režimu grijanja

Režim grijanja, EST O°C							
COP 4,5	Izračunati prinos W/m	Duljina izmjenjivača, m	Broj radnih sati, h *	kW_t geo.	∑ instal. kW_t	GWh_t geotermalni	GWh_t geo+el.
2U	53,2	41 335	1200	2 199	2817,3	2,64	3,39
CX	32,2	3 280	1200	106	235,8	0,13	0,16
∑		44 615		2305	2963	2,77	3,56

*godišnji ekvivalent broja radnih sati dizalice topline u režimu grijanja pri punoj snazi

Tablica 8-2. Proračun instalirane toplinske snage i pridobive energije iz geotermalnih izvora u režimu hlađenja

Režim hlađenja, EST 25°C							
EER 5,5	Izračunati prinos W/m	Duljina izmjenjivača, m	Broj radnih sati, h *	kW_t geo.	∑ instal. kW_t	GWh_t geotermalni	GWh_t geo+el.
2U	42,1	41 335	400	1 741	1 472,9	0,70	0,85
CX	24,9	3 280	400	82	61,9	0,03	0,04
∑		44 615		1822	1542	0,73	0,89

*godišnji ekvivalent broja radnih sati dizalice topline u režimu hlađenja pri punoj snazi

Prema proračunu provedenom u tablicama, ukupna toplinska energija pridobivena iz tla tijekom cijele godine, procjenjuje se na 3,5 GWh. S obzirom na ukupnu obnovljivu energiju iz plitkih geotermalnih izvora u Europskoj Uniji prema posljednjem EurObserver koja iznosi 102, 344 TWh, obnovljiva energija iz plitkih geotermalnih izvora u Hrvatskoj čini 0,0003% te sume.

9. ZAKLJUČAK

Terenska mjerenja i određivanje toplinskih svojstava tla, s obzirom na posebnost svake lokacije koja se razmatra za postavljanje bušotinskih izmjenjivača topline, najsigurnija je metoda izbjegavanja nepotrebne predimenzionirani ili poddimenzioniranosti budućeg plitkog geotermalnog sustava. Nove mogućnosti inovativne metode razrađene u ovom diplomskom radu pomoću koje je uz konvencionalno određivanje toplinskih parametara, moguće odrediti i optimalan, održivi toplinski prinos bušotinskih izmjenjivača. To je iznimno važno kod hibridnih geotermalnih sustava prilikom određivanja bivalentne točke i maksimalnog mogućeg prinosa toplinske snage koja neće narušiti dugoročnost sustava i uzrokovati pretjerano pothlađivanje tla pri vršnim uvjetima. Kvalitetna baza podataka o termo-tehničkim svojstvima postojećih sustava od iznimne je pomoći inženjerima prilikom projektiranja budućih sustava. S obzirom da je razvoj tehnologije u području razvoja iskorištavanja plitkih geotermalnih izvora usmjeren u reduciranju visokih kapitalnih troškova, dostupne informacije o prosperitetu instalacija na sličnim litološkim karakteristikama od iznimne je važnosti. Za stvaranje takve baze podataka, koja za članice Europske Unije predstavlja standard i nužnost, prije svega je odgovorna državna uprava. Osnivanje novog državnog ureda, ili pridavanje odgovornosti već postojećem regulativnom uredu ili energetskoj agenciji kojoj će izvođač radova geotermalnih sustava biti dužan dostaviti obraza o termo-tehničkim parametrima i testnim prinosima novoizgrađenog sustava, samo je jedna od ideja kako iskoristit početnu bazu sustava prikupljenu i obrađenu u sklopu ovog diplomskog rada. Potpuno definiranje tehnologije, dostupna baza podataka o učinkovitosti, perspektivnosti i mogućnosti povrata investicije, ključni su parametri u ostvarivanje državnih poticaja koji su nužni u promicanju obnovljivih izvora energije. U slučaju Republike Hrvatske, gdje su na području panonske nizine termo-geološka svojstva tla iznad europskog prosjeka, i dalje govorimo o neiskorištenom potencijalu plitkih geotermalnih izvora.

10. POPIS LITERATURE

1. AL-KHOURY, R.., BONNIER, P.G.; BRINKGREVE, R.B.J., 2005. *Efficient finite element formulation for geothermal heating systems. Part I: Steady state*, Int. J. Numer. Methods, United Kingdom
2. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), 2011. *ASHRAE Handbook—HVAC Applications*; American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers: Atlanta, GA, USA, poglavlje 34
3. ANTIĆ, LJ., BLAGEC, K., ZUBČEVIĆ, I., BERTIĆ, I., BERTOVIĆ, S., BROZOVIĆ D., KUŠAR, V., PRELOGOVIĆ, E., KLEMENČIĆ. M., 1993. *Atlas of the Republic of Croatia & the Republic of Bosnia and Hercegovina*, Leksikografski institut, Zagreb, str. 159
4. BUDIN, R., MIHELIĆ-BOGDANIĆ, A., 2012. *Osnove tehničke termodinamike*, 3. izdanje, Zagreb: Školska knjiga
5. CARSLAW, H.S.; JAEGER, J. C., 1946. *Conduction of Heat in Solids*, Claremore Press: Oxford, Ujedinjeno Kraljevstvo
6. CHAUDHRY, A., 2003. *Gas well testing handbook*, Huston: Gulf professional publishing
7. DIERSCH, H.-J.G.; BAUER, D.; HEIDEMANN, W.; RÜHAAK, W.; SCHÄTZL, P., 2011. *Finite element formulation for borehole heat exchangers: Part 1. Fundamentals*, Computer Geoscience, **37**, str.1122–1135.
8. Energetski institut Hrvoje požar, 2016. *Energija u Hrvatskoj 2015*, Ministarstvo gospodarstva Republike Hrvatske: Zagreb
9. EPTING, J., GARCIA-GIL, A., HUGGENBERGER P., VÁZQUEZ-SUÑE, E., MÜLLER, M.H., 2017. Development of concepts for the management of thermal resources in urban areas – Assessment of transferability from the Basel (Switzerland) and Zaragoza (Spain) case studies, *Journal of Hydrology*, **548**, str. 697-715
10. EurObserver, 2016. *Heat Pumps Barometer - 2015*
11. GEHLIN, S., 2002. Thermal Response Test: Method Development and Evaluation, Doktorska disertacija, Luleå University of Technology, Luleå, Sweden
12. HORNER, D.R., 1951. Pressure Buildup in Wells, Third World Petroleum Congress, Haag, Nizozemska, 28 Svibanj 28–6 Lipanj 1951

13. INGERSOLL, L.R., ZOBEL, O.J., INGERSOLL, A.C., 1954. Heat Conduction with Engineering, *Geological and other Applications*, McGraw-Hill: New York, NY, USA, str. 325-327
14. JELIĆ, K.; KEVRIĆ, I., 1997. *Plitka geotermalna energija u Hrvatskoj*, 6. forum Hrvatskog energetskog društva , Zagreb : Hrvatsko energetsko društvo, str. 181-199
15. Klein, B., Independent testing of heat pumps is needed for reliable COP, *REHVA Journal*, 2012
16. KUREVIJA, T.; STRPIĆ, K., 2018a. Hydraulic and thermogeological design differences between two-loop vertical and inclined coaxial borehole heat exchangers, *Renewable Energy*, **117**, str. 314–323
17. KUREVIJA, T.; MACENIĆ, M.; STRPIĆ, K., 2018b. Steady state heat rejection rates for coaxial borehole heat exchanger during passive and active cooling determined with the novel thermal response test method, *Rudarsko- geološko- naftni zbornik*, **33**, str. 1–17
18. KUREVIJA, T., STRPIĆ, K., KOŠČAK-KOLIN, S., 2018c. Applying petroleum pressure buildup test procedure on Thermal Response Test – a novel method to improve accuracy of thermal conductivity determination, *Energies*, **11(2)**
19. KUREVIJA, T., VULIN, D., KRAPEC, V., 2014. Influence of Undisturbed Ground Temperature and Geothermal Gradient on the Sizing of Borehole Heat Exchangers, *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, **38**, str. 39-45
20. KUREVIJA, T., VULIN, D., KRAPEC, V., 2012. Effect of borehole array geometry and thermal interferences on geothermal heat pump system, *Energy Conversion and Managment*, **60**, str.134-142
21. KUREVIJA, T., 2010. Energetsko vrednovanje plitkih geotermalnih potencijala Republike Hrvatske, Doktorska disertacija, Rudarsko-Geološko-Naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb
22. LALOUI, L., DI DONNA, A., 2013. Energy geostructures: innovations in underground, *22. Engineering, Civil Engineering and Geomechanics Series,* str. 320
23. LEE, J., 1982. *Well Testing*, 1. izdanje, Society of Petroleum Engineers of AIME: New York, NY, USA, str.1–71
24. MAN, Y., YANG, H., DIAO, N., LIU, J., FANG, Z., 2010. A new model and analytical solutions for borehole and pile ground heat exchangers, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **53**, str. 2593- 2601

25. MATTHEWS, C.S.; RUSSELL, D.G., 1967. *Pressure Buildup and Flow Tests in Wells*, Society of Petroleum Engineers of AIME; Henry L. Doherty Memorial Fund of AIME: New York, NY, USA
26. Ministarstvo Graditeljstva i prostornog uređenja, 2018. *Pravilnik o jednostavnim i drugim građevinama i radovima*, Narodne Novine **34/2018**
27. NARASIMHAN, T.N., 1999. Fourier's heat conduction equation: history, influence and connections, *Geophysics*, **37**, str. 151-172
28. OMER, A.M., 2008. Ground-source heat pumps systems and applications, *Renewable and Sustainable Energy Rewievs*, **12**, 344-371
29. RAYMOND, J.; THERRIEN, R.; GOSSELIN, L.; LEFEBVRE, R., 2011. A review of thermal response test analysis using pumping test concepts, *Ground Water,* **49**, str. 932–945
30. SOLDO V., BOROVIĆ S., LEPOŠA L., BOBAN L., 2016a. Comparison of different methods for ground thermal properties determination in clastic sedimentary environment, *Geothermics*, **61**, str. 1-11
31. SOLDO V., BOBAN L., BOROVIĆ S., 2016b. Vertical distibution of shalow ground thermal properties in different geological settings in Croatia, *Renewable Energy*, **99**, str. 1202-1212
32. STEWART G., 2011. *Well Test Design & Analysis*, PennWell Corporation: Tulsa, Oklahoma
33. STRPIĆ, K., 2017. Razvoj nove metode izvođenja i interpretacije testa odaziva topline tla primjenom modela hidrodinamičkih ispitivanja u naftnom inženejrstvu, Rektorova nagrada, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb
34. TINTI F., Giambatistiani B., M., S., Mastrocicco, M., 2014. Types of geo-exchanger systems for underground heat extraction, *Geothermal and Ocean Environment*, Publisher: Energy Science & Tecnology, **9**, Studium Press LLC: USA
35. WITTE, H.J.L., 2001. Geothermal Response Test with heat-extraction and heat-injection application in research and design of Geothermal Ground Heat Exchangers, Europaischer Workshop über Geothermische response test, 25-26.10. 2001, EPFL: Lausanne
36. ZERVANTONAKIS, I., REUSS, M., 2006. Quality requirements of a Thermal Response Test. Proc. ECOSTOCK 06, 10th Int. Conference on Thermal Energy Storage, Bavarian Center for Applied Energy Research: Bayern

IZJAVA

Izjavljujem da sam diplomski rad pod nazivom *ODREĐIVANJE OPTIMALNOG TOPLINSKOG PRINOSA BUŠOTINSKIH IZMJENJIVAČA TOPLINE I POTENCIJAL TEHNOLOGIJE U REPUBLICI HRVATSKOJ* izradila samostalno, pod mentorstvom dr. Sc. Tomislava Kurevije. U diplomskom radu sam primijenila metodologiju znanstveno-istraživačkog rada koristeći literaruru navedenu u posljednjem poglavlju rada.

Kristina Strpić